

2899

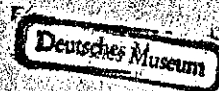
P 55

H.

TARGET: UNKNOWN

RECEIVED: 7th ARMY DOCUMENT CENTER

F. L. A. D. W.



Deutsche Luftfahrtforschung

Forschungsbericht Nr. 1491

Kondensation und Sublimation in der oberen Troposphäre

aufm Kampe

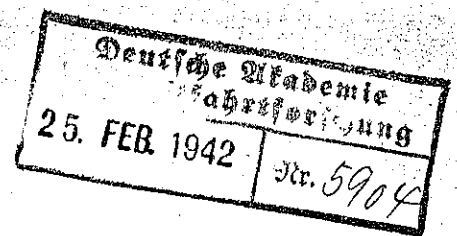
Verfaßt bei

Deutsche Forschungsanstalt für Segelflug

Zentrale für wissenschaftliches Berichtswesen
der Luftfahrtforschung des Generalluftzeugmeisters (ZWB)
Berlin-Adlershof

DUPLICATE

1491



Deutsches Museum

Kondensation und Sublimation in der oberen
=====

Troposphäre.
=====

U e b e r s i c h t.

Die Kondensfahnen hinter Flugzeugen, die durch die Zufuhr des Wasserdampfes der Auspuffgase in die Atmosphäre entstehen, treten bei der Hs 126 am häufigsten bei Temperaturen von etwa -45° auf. Das heisst aber, dass die relative Feuchtigkeit in den Höhen zwischen 8 und 10 km durchschnittlich 50 % beträgt.

Je nach der Grösse der Vertikalgeschwindigkeiten der aufsteigenden, wolkenbildenden Luftmassen kommt es in diesen Höhen zur Eis- oder Wasserwolkenbildung. Bei grösseren Vertikalbewegungen bilden sich frostübersättigte Schichten, in denen die Kondensfahnen unmittelbar hinter dem Flugzeug schon bei Temperaturen von etwa -38 bis -40° C auftreten. In Eiswolken erscheinen sie meistens bei -43° C.

Die Elemente der Cirren sind zum grössten Teil unregelmässige Eisklumpchen und nur seltener gut ausgebildete hexagonale Vollkristalle. - Die Mächtigkeit der Cirren beträgt oft mehrere Kilometer.

Gliederung:

=====

I. Problemstellung.

II. Einleitung.

III. Untersuchungen über die Kondensfahnenbildung.

- 1.) Flugtechnisches bei den Versuchen.
- 2.) Meßmethode und Meßergebnisse.
- 3.) Auswertung der Meßergebnisse.
- 4.) Fehlerabschätzung.
- 5.) Die mittlere relative Feuchtigkeit in der oberen Troposphäre.
- 6.) Auspuffwolkenbildung bei Eissättigung.

IV. Kondensation und Sublimation.

- 1.) Theorie der Tropfen- und Kristallbildung.
- 2.) Die Rolle der Kondensationskerne.
- 3.) Sublimationskerne.
- 4.) Die Rolle der Keimbildungsgeschwindigkeit in der Atmosphäre.
- 5.) Konvektionswolken.
- 6.) Die Umbildung von unterkühlten Tröpfchen in Eiskristalle.
- 7.) Advektionswolken.
- 8.) Kondensfahnenbildung in frostübersättigten Schichten.
- 9.) Künstliche Impfung der oberen Troposphäre. S. 96
- 10.) Wasserübersättigung in der oberen Troposphäre?
- 11.) Die Umbildung der Kondensfahne in eine Eiswolke.
- 12.) Optische Erscheinungen in den sich verbreiternden Kondens-
fahnen.

V. Die Cirren.

- 1.) Kristallformen in Cirren.
- 2.) Mächtigkeit von Cirren.

VI. Zusammenfassung.

VII. Literaturverzeichnis.

Der Bericht umfasst:

62 Seiten mit
26 Abbildungen

Deutsche Forschungsanstalt für Segelflug

Der Abteilungsleiter:

J.V.

J. Popmann

Der Bearbeiter:

Ernst Rumpke

Ainring/Obb., 24.1.42

Problemstellung.

Hinter Flugzeugen in größerer Höhe kann man oft mehr oder weniger lange Kondensfahnen beobachten. Da diese grellen "Wolkenschweife" dem Feind ein Flugzeug leicht zu erkennen geben, das man ohne solche sicherlich nicht gesehen hätte, geht das Bestreben dahin, diese Kondensfahnen zu verhindern. Bevor aber dieses Problem in Angriff genommen werden kann, ist es notwendig, zuerst die Voraussetzungen und Bedingungen zu kennen, unter denen Kondensfahnen überhaupt auftreten. Dafür ist besonders die Kenntnis der Feuchtigkeitsverhältnisse in großen Höhen von Bedeutung. Bis jetzt gibt es noch kein Instrument, mit dem man bei tiefen Temperaturen die Feuchtigkeit messen kann. Man mußte daher nach einem Hilfsmittel greifen, und zwar besteht dieses in den Kondensfahnen selbst. Aus ihren Längen und Entwicklungsformen kann man auf den Feuchtigkeitsgehalt der sie umgebenden Luft schließen, und aus dem Beginn der Kondensation erhält man auch Einblick in die komplizierten Vorgänge der Phasenänderung des Wasserdampfes in der oberen Troposphäre.

Einleitung.

Bei seinen Polarexpeditionen hat bereits A.Wegener¹⁾ auf Kondensations- und Sublimations-Erscheinungen aufmerksam gemacht, die z.B. bei den dort herrschenden tiefen Temperaturen in Bodennähe den Weg einer Renntierherde kennzeichneten. Er führte diese "Wolkenschweife" darauf zurück, daß die Luft über dem Eis sehr rein sei, und ihr deshalb die für die Kondensation oder Sublimation nötigen Kerne fehlten, sodaß auch bei stärkeren Übersättigungen keine Verdichtung des Wasserdampfes stattfinden könnte. Werden ihr diese Kerne aber wie in diesem Beispiel durch die Ausatmung der Renntiere zugeführt, so tritt spontane Kondensation oder Sublimation ein. H.Köhler²⁾ dagegen schreibt nicht der Kern-, sondern der Wasserzufuhr die Ursache für diese Wolkenbildung zu. Die Ansicht Wegeners haben auch noch andere Meteorologen geteilt^{3,4,5)}. Sie sahen in den Kondensfahnen hinter den Flugzeugen das gleiche Phänomen wie es Wegener bei seinen Beobachtungen in der Arktis hatte, und die Ansicht über die Kerninfektion wurde dadurch nur verstärkt; denn auch in den hohen Troposphären- und unteren Stratosphärenschichten vermutete man wegen Kernarmut öfters größere Übersättigungen.

Wenn auch diese Annahme in einigen Fällen richtig sein mag, so ist doch die Grundeinstellung - nämlich die, daß die Kondensation oder Sublimation *a l l e i n* durch Kernzufuhr ausgelöst wird - nicht zutreffend. Vielmehr ist bei den Wolkenschweifigen hinter Motorflugzeugen die Wasserdampfzufuhr das Primäre, was im Folgenden gezeigt werden soll, und was bereits durch Humphreys⁴⁾ und H.Kirsten⁶⁾ vor einigen Jahren und E.Schmitt⁷⁾ sowie F.Höndorf⁸⁾ in letzter Zeit ausgesprochen wurde.

⁴⁾ Betr. eine Anmerkung zu einer Beobachtung von M.Varney in der "Monthly Weather Review" 1921.

Die Deutsche Forschungsanstalt für Segelflug hat im Rahmen ihrer Untersuchungen der oberen Troposphäre und unteren Stratosphäre auch dem Auftreten der Auspuffwolken weitestgehende Beachtung geschenkt und sie systematisch auf Vorkommen und Eigenart untersucht. Sie bilden ein sehr schönes Hilfsmittel, mit dem man ohne zu expandieren bei tiefen Temperaturen durch Wasserdampfung künstlich Wolken erzeugen und ihre weitere Entwicklung sehr gut verfolgen kann, ein Experiment, das in dieser Form im Laboratorium nicht ganz einfach durchzuführen ist.

Flugtechnisches bei den Versuchen.

Zu den wohl zum ersten Mal regelmäßig durchgeführten Höhengestiegen auf 10 000 m wurde als Aufstiegsmaschine eine Henschel 126 verwendet, die mit einem Bramo-Fafnir-Motor ausgerüstet die Gipfelhöhe von 10 000 m erreicht. Gesteuert wurde die Maschine bei allen Aufstiegen von dem gleichen Flugzeugführer (F.Lettmayer), der sie immer mit gleicher Tourenzahl flog. Der Benzinverbrauch war deshalb auch immer derselbe. Der Staudruck betrug in 8000 m 150 km/h und nahm bis 10 000 m stetig bis auf 135 km/h ab. Das bedeutet, daß die Maschine in der besonders interessierenden Höhengesticht zwischen 8000 und 10 000 m immer die gleiche Relativgeschwindigkeit von 66 m/s hatte. Der Benzinverbrauch zwischen 8000 und 10 000 m betrug etwa 180 l/h. Diese Zahl wurde nicht aus den Prüfstandsergebnissen entnommen, die von der Praxis oft erheblich abweichen, sondern sie bedeutet den tatsächlichen Brennstoffverbrauch beim Flug in diesen Höhen. Als Brennstoff diente "Oktan 87". Nach der "Hütte" (Bd. I, 1936, S. 575) entstehen bei der Verbrennung von 1 kg Benzin 1,6 bis 1,7 kg Wasser. Da "Oktan 87" ein spez. Gewicht von 0,75 hat, ergibt 1 l Benzin etwa 1,25 l Wasser. Unter der Annahme, daß in 8000 m nur 80 % des Brennstoffes verbrennen, kommen auf 1 l Benzin 1 l Wasser. Da in der Stunde 180 l Benzin verbraucht werden, werden sekundlich 50 g Wasser aus dem Auspuff ausgestoßen, ein Wert, den man auch etwa erhält, wenn man den spez. Brenn-

stoffverbrauch nach den Prüfstandsmessungen zugrunde legt.

Bekanntlich ist der Wirkungsgrad eines Benzin-Motors nicht sehr groß. Etwa 60 % der bei der Verbrennung frei werdenden Wärme geht durch den Auspuff in die freie Atmosphäre. Der Wasserdampf und die Wärmemenge des Auspuffstrahles verteilen sich im Flug in einem Raum, der - wenigstens bis etwa 150 m hinter dem Flugzeug - durch die Begrenzung des Propellerstrahles gegeben ist. In größerer Entfernung von der Maschine kommen dann die Auspuffgase in die Wirbelzöpfe der Flächenenden (Abb. 1).

Überschreitet nun an einer Stelle im Strahl der Wasserdampfgehalt, der sich aus dem Wasserdampf des Auspuffs und dem der Luft zusammensetzt, den Sättigungswert, so kommt es zur Kondensation. Daß der Wasserdampf trotz der tiefen Temperaturen kondensiert und nicht sublimiert, erkennt man daran, daß sich an einem ausgefahrenen Schleppkörper und einem in einiger Entfernung (bis einige 100 m) dahinter fliegenden Flugzeug Rauhrostbeschlag bildet, der ja bekanntlich durch das Gefrieren auffallender unterkühlter Tröpfchen entsteht. Die kurzen Kondensfahnen bestehen also aus Wassertröpfchen. Nach Kenntnis dieser Tatsache kann man die relative Feuchtigkeit der Luft berechnen, wenn man die absolute Feuchtigkeit (g/m^3) und die Temperatur an der Stelle des Auspuffstrahles kennt, an der die Kondensation beginnt.

Meßmethode und Meßergebnisse.

Die Begrenzung des Propellerstrahles ist, wie die Abb. 2 zeigt, ziemlich scharf, und der Querschnitt stellt, wie es sich durch Photographieren des Strahles von unten und der Seite zeigte, etwa eine Ellipse dar, die - zumindest in der Nähe der Maschine - fast in einen Kreis übergeht. In 6 m Entfernung z.B. beträgt der Horizontaldurchmesser 2,3 m und der Vertikaldurchmesser 2,1 m. Zur einfacheren Berechnung des Querschnittes konnte daher ohne Bedenken anstatt der Ellipse ein Kreis angenommen werden, dessen Durchmesser durch Mittelung der Ellipsendurchmesser berechnet wurde. Die horizontale Erstreckung des Strahles wurde vom Boden aus fast bei jedem Flug, wenn es das Wetter gestat-



Abb. 1: Kondensfahne, vom Flugzeug aus gesehen;
man erkennt deutlich die Wirbel, die sich von den
Flächenenden ausgehend in einiger Entfernung hinter
dem Flugzeug bilden.

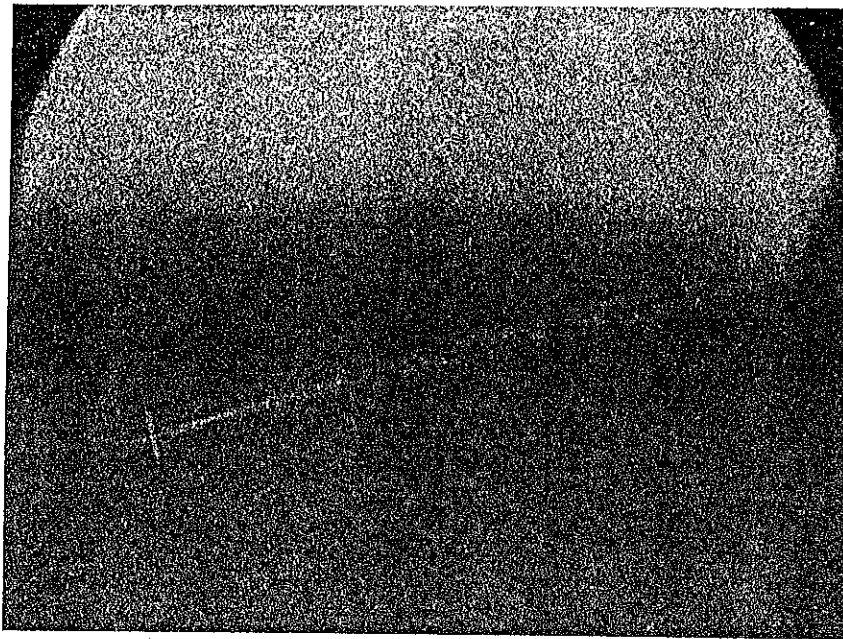


Abb. 2: Kondensfahne in 8 - 9 km, vom Boden mit Fernrohrob-
jektiv ($f = 110$ cm) aufgenommen.

tete, mit einer Kamera photographiert, die auf einem 30fach vergrößernden Fernrohr montiert war. Die Vertikalerstreckung wurde von einem nebenherfliegenden Flugzeug aufgenommen. Allerdings konnten dabei nur die ersten 20 m hinter dem Flugzeug erfaßt werden. Ab 20 m wurden sie aus der Horizontalerstreckung extrapoliert, unter der Annahme, daß die fast kreisförmige Gestalt des Querschnittes erhalten bleibt. Durch Ausmessung der Photographien wurde dann der Querschnitt des Luftschraubenstrahles bestimmt.

Die Temperatur im Auspuffstrahl wurde direkt im Flug gemessen. Als Temperaturgeber dienten stabförmige Widerstands-Thermometer von der Fa. Heraeus, Hanau, und solche, die von uns selbst hergestellt wurden. Sie wurden in der Wheatstone'schen Brücke so geschaltet, daß nicht die Temperaturen selbst, sondern die Differenzen zwischen Außenluft und Auspuffstrahl unmittelbar bestimmt wurden. Zu diesem Zweck wurde 1,5; 8,5; 18,5; 28,5 usw. bis 68,5 m hinter dem Auspuffrohr gemessen. Die ersten beiden Meßstellen waren seitlich vom Flugzeug-rumpf angebracht (Abb. 3, 4).

Das Bezugsthermometer für die Außenluft war an die Flächenstrebe montiert (Abb. 5).

Die Meßstellen in 18,5 m und größerer Entfernung waren an einem Segelflugzeug befestigt (Abb. 6), das mit den entsprechenden Seillängen vom Motorflugzeug geschleppt wurde.

Das Thermometer, mit dem die Temperatur des Auspuffstrahles gemessen wurde, war am unteren Ende einer Stange montiert, die aus dem Rumpf des Segelflugzeuges geschoben werden konnte, sodaß man in der Lage war, mit dem Thermometer den Auspuffstrahl abzutasten. (Siehe Abb. 6). Das Bezugsthermometer befand sich am Flächenende.

In dem Bereich zwischen dem Leitwerk, das sich 8,5 m hinter dem Auspuffstutzen befindet, und 10 m dahinter wurde die Temperatur ebenfalls gemessen; und zwar befand sich das Thermometer hierfür in einem Schleppkörper, der gut im Auspuffstrahl lag und hinter der Maschine nachgeschleppt wurde. Während die Temperaturdifferenzen im Segelflugzeug an einem Amperemeter abgelesen wurden, wurden diejenigen an den Meßstellen des Motorflugzeuges und des Schleppkörpers auf einem

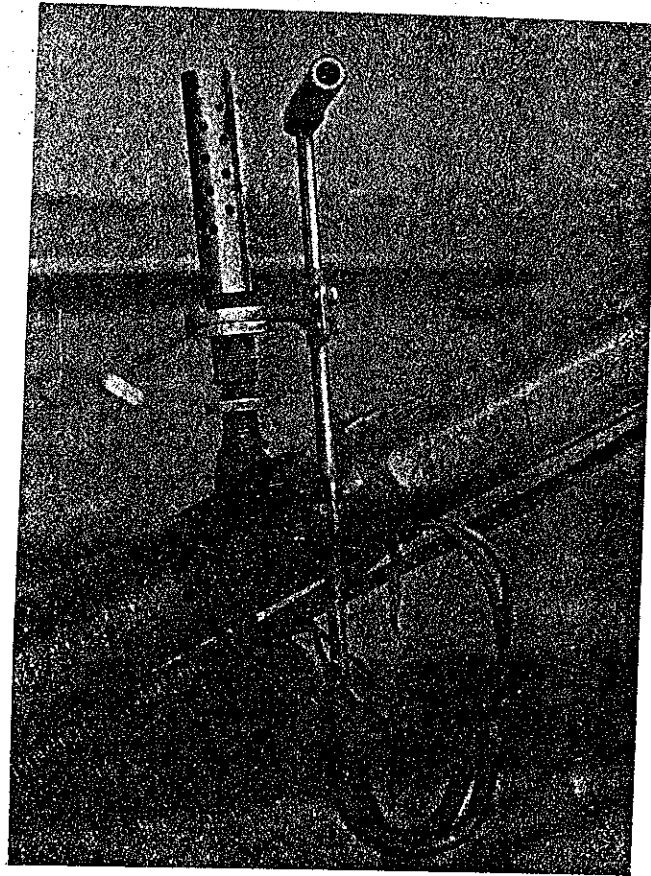


Abb. 3: Thermometer und Staudruckdüse
an der Flächenstrebe.

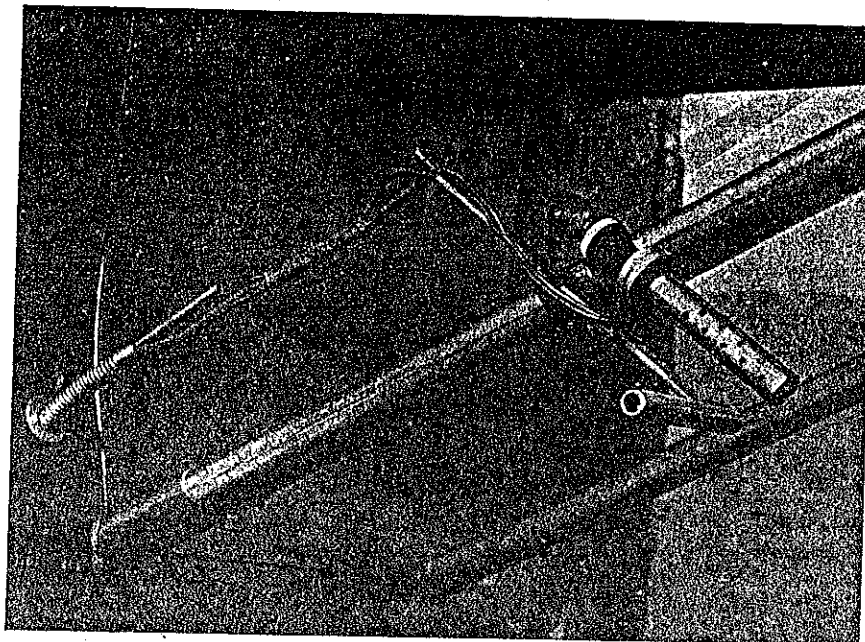


Abb. 4: Thermometer und Staudruckdüse
an der Leitwerksstrebe.

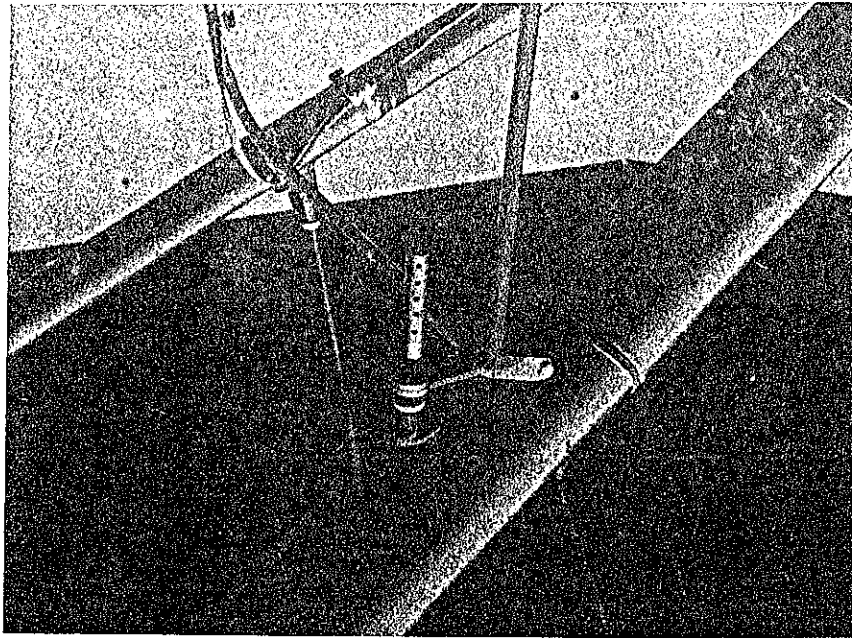


Abb. 5: Thermometer an der Flächenstrebe
außerhalb des Auspuffstrahles.



Abb. 6: Das Segelflugzeug, das von dem Motor-
flugzeug geschleppt wurde und an einer
vertikal verschiebbaren Stange das
Thermometer und die Staudruckdüse trug.

Askania-Vierfachsreiber registriert. Eine solche Registrierung zeigt Abb. 7. Die Mittelwerte der einzelnen Meßstellen sind durch eine Kurve verbunden - in Abb. 8 dargestellt. Man erkennt erstens entsprechend der starken Verbreiterung des Auspuffstrahles knapp hinter dem Auspuff den starken Temperaturabfall in diesem Teil des Strahles und zweitens, daß die Temperaturdifferenz etwa 60 m hinter der Maschine nur noch $1,5^{\circ}\text{C}$ beträgt. In dieser Darstellung sind, wie schon erwähnt, nur die Mittelwerte der Differenzen aus zahlreichen Flügen aufgetragen. Die absoluten Differenzen schwanken je nach der Entfernung der Meßstelle vom Auspuffrohr um einige Prozent. Es ist also z.B. die Temperatur des Auspuffstrahles bei einer Lufttemperatur von -45° 13 m hinter dem Leitwerk nicht immer gleich -40° , sondern dieser Wert kann von Flug zu Flug um einige Zehntel Grad schwanken. Diese Tatsache ist wichtig, wenn man vom Beginn der Auspuffkondensation Rückschlüsse auf die Feuchtigkeit der umgebenden Luft ziehen will.

Für die Bestimmung der absoluten Feuchtigkeit im Auspuffstrahl (= Propellerstrahl) ist noch die Geschwindigkeitsdifferenz des Strahles gegen die Geschwindigkeit der Motormaschine wichtig. Zu diesem Zweck wurde jeweils neben dem Thermometer ein Staurohr angebracht (Abb. 3, 4, 6), das die Geschwindigkeit im Strahl anzeigte. Während der Unterschied zwischen der Ausströmgeschwindigkeit der Auspuffgase und der Fluggeschwindigkeit im Auspuff sehr groß ist, nimmt er dahinter erwartungsgemäß schnell ab und beträgt 70 m hinter der Maschine nur noch etwa 10 km/h, d.h. etwa 100 m hinter der Maschine ist im Auspuffstrahl praktisch keine Übergeschwindigkeit in der Flugrichtung mehr vorhanden.

Auswertung der Meßergebnisse.

Nachdem die Temperatur- und Geschwindigkeitsverteilung sowie die Querschnittserweiterung längs des Auspuffstrahls bestimmt sind, und außerdem mit der verbrannten Benzinmenge auch die Wasserdampfzufuhr bekannt ist, kann man - wenigstens in erster Näherung - die Bedingungen auf-

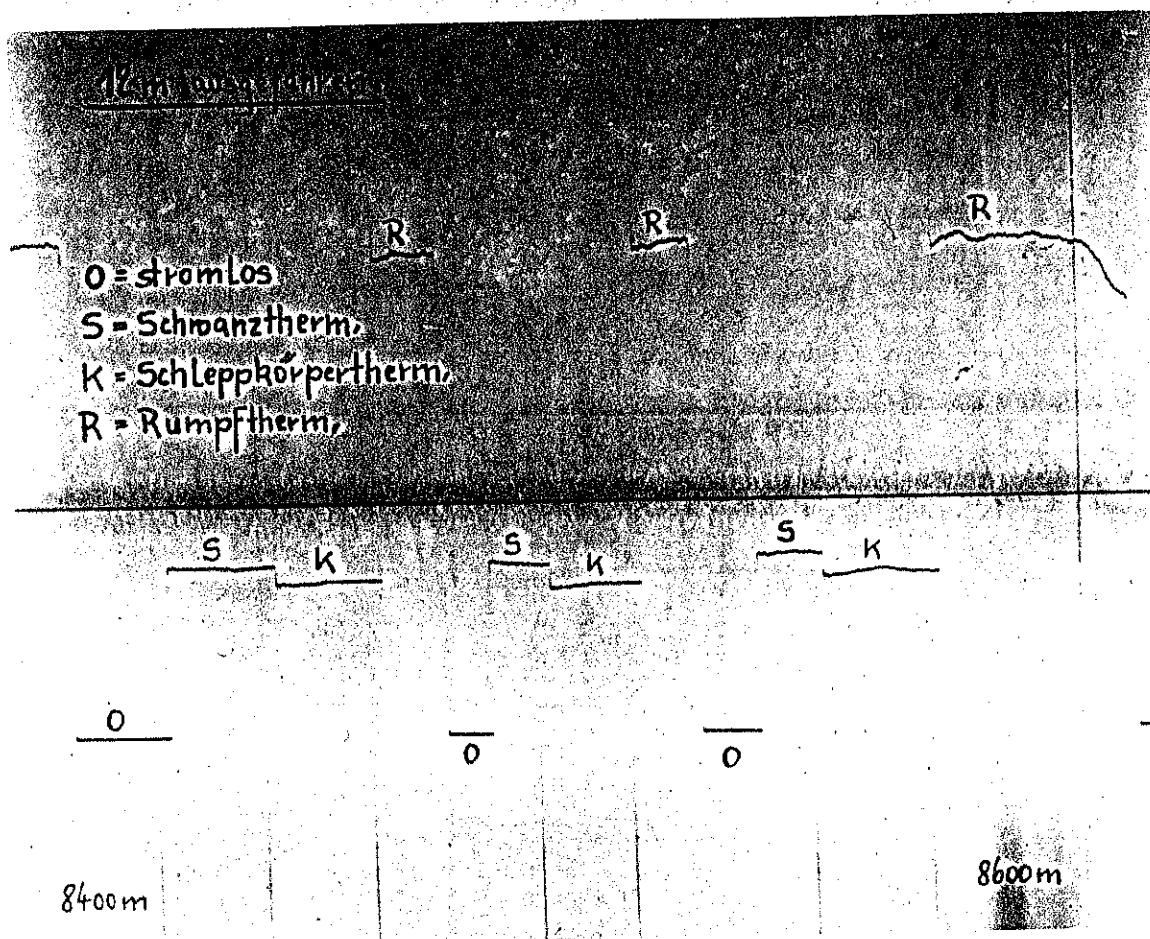


Abb. 7: Vierfachschreiber-Aufzeichnungen der Temperaturen 1,5 m hinter dem Auspuff (Rumpf-Thermometer), am Leitwerk (Schwanz-Thermometer) und 12 m hinter dem Leitwerk (Schleppkörper-Thermometer).

Maßstäbe:

Abszisse:	1 cm auf Abb.	=	20 sec.
Ordinate: R,	1 " " "	=	8,0°C.
S,	1 " " "	=	7,4°C.
K,	1 " " "	=	7,8°C.

(Für K liegt 0-Linie 1,3 cm über der Linie "stromlos".)

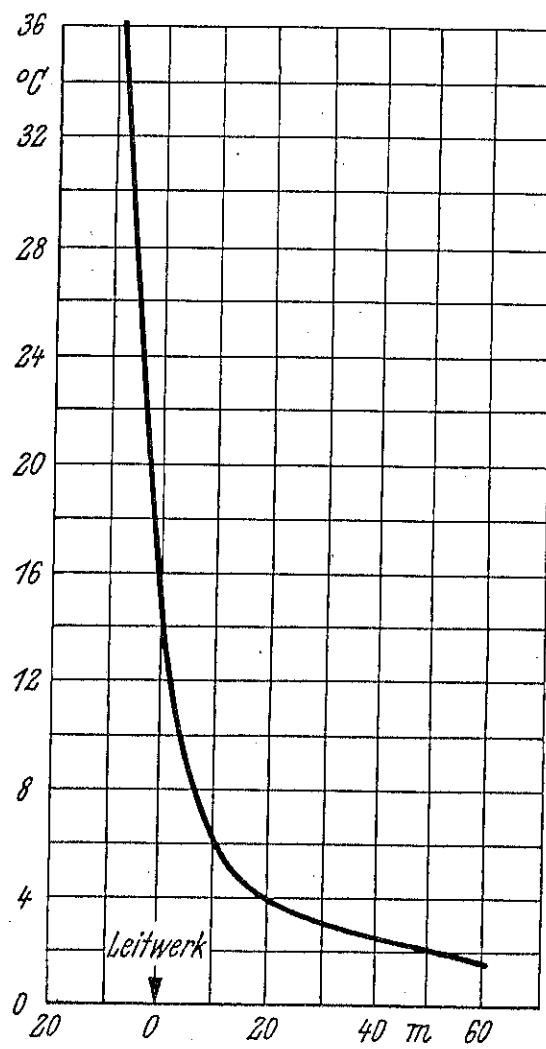


Abb.8: Übertemperatur im Auspuffstrahl in Abhängigkeit vom Abstand hinter dem Leitwerk

zeichnen, unter denen Kondensfahnen hinter der Henschel 126 entstehen können. Erst wenn die meteorologischen Werte bekannt sind, kann man daran gehen, sich Gedanken darüber zu machen, wie man diese Kondensfahnen von Fall zu Fall vermeiden kann. Wenn auch alle folgenden Überlegungen quantitativ nur für die Hs 126 gelten, so hat doch die Erfahrung gelehrt, daß die Bedingungen für das Auftreten der Kondensfahnen bei den verschiedenen Typen sich zwar etwas ändern, die Unterschiede im allgemeinen aber nicht sehr groß sind.

In der folgenden Tabelle sind noch einmal die Ergebnisse der Messungen im Auspuffstrahl bis 60 m hinter dem Leitwerk zusammengestellt:

Tabelle 1. Verhältnisse im Schraubenstrahl.

Abstand von Maschine	Durch- messer	Quer- schnitt	Stau- druck- geschw.	H ₂ O Anteil der Aus- puffgase	Übertemp. gegen Außenluft
a	b	c	d	e	f
6 m	2,2 m	3,9 m ²	77 m/s	0,166 g/m ³	3,0°C
10	2,5	4,9	75	0,136	6,0
20	3,0	7,1	74	0,095	3,7
30	3,6	10,2	72	0,068	3,0
40	4,2	13,8	71	0,051	2,5
50	4,8	18,1	70	0,040	2,0
60	5,4	23,7	69	0,030	1,5

Wie bereits erwähnt, spielen zwei Faktoren für die Erreichung des Sättigungswertes im Schraubenstrahl eine Rolle: Der Feuchtigkeitsgehalt und die Temperatur. Die absolute Feuchtigkeit nimmt mit wachsendem Abstand von der Maschine - wegen der Verbreiterung des Strahles - ab; desgl. die Temperatur. Da aber die relative Feuchtigkeit mit dem Feuchtigkeitsgehalt wächst und mit steigender Temperatur abnimmt, kompensieren sich beide Größen teilweise. Es wird nun eine Stelle im Strahl geben, an der die relative Feuchtigkeit ein Maximum hat. An dieser Stelle wird dann auch zuerst die Kondensation beginnen, nämlich dann, wenn dort 100 % überschritten werden.

Da bei den durchgeführten Flügen in den meisten Fällen die Auspuffkondensation etwa bei -45°C begann, sei für die folgenden Berechnungen -45° als die Temperatur der ungestörten Atmosphäre angenommen. Im Strahl erhält man dann folgende Werte:

Tabelle 2.

Abstand von der Maschine	Temperatur	Zur Sättigung notwen- diger Wasserdampf (nach F.Linke, Met.Tschb.IV)
a	b	c
6 m	-37°C	0,230 g/m ³
10	-39	0,190
20	-41,3	0,152
30	-42	0,142
40	-42,5	0,135
50	-43	0,128
60	-43,5	0,122

Subtrahiert man Spalte e Tabelle 1 von Spalte c Tabelle 2, so erhält man die zur Kondensation noch fehlenden Wasserdampfmengen. Sie sind in Spalte b Tabelle 3 eingetragen. Soll Wolkenbildung eintreten, dann muß diese zur Kondensation noch fehlende Wasserdampfmenge in der ungestörten - aus der Umgebung zugeführten - Luft enthalten gewesen sein. Bei einer Temperatur der ungestörten Luft von -45° ergeben sich die in Spalte c Tabelle 3 eingetragenen relativen Feuchtigkeiten; werden diese Werte nicht erreicht, dann bleibt die Wolkenbildung aus.

Aus Tabelle 3 erkennt man, daß etwa zwischen 10 und 20 m die Stelle mit den geringsten Anforderungen an die Feuchtigkeit der ungestörten Umgebung liegt, an der die Kondensation also zuerst beginnen muß.

Tabelle 3.

Abstand von der Maschine	fehlender Wasserdampf	Zur Sättigung im Strahl notwendige rel. Feuchte der Luft von -45° .
a	b	c
6 m	0,064 g/m ³	61 %
10	0,054	51
20	0,057	54
30	0,074	70
40	0,084	80
50	0,088	84
60	0,092	87

Abb. 9 zeigt bei genauer Betrachtung, daß tatsächlich die Kondensation der Auspuffgase zuerst zwischen 10 und 20 m hinter dem Leitwerk beginnt. Die Theorie stimmt also mit der Wirklichkeit gut überein. Bei höheren Temperaturen rückt diese Stelle weiter nach hinten, was leicht nachzurechnen ist. Wenn auch bei 15 m Abstand keine Messungen vorliegen, so kann man durch Interpolation die zur Berechnung notwendigen Werte bestimmen. Es sind dies etwa: Übertemperatur $4,5^{\circ}$, Querschnitt $6,0 \text{ m}^2$, Geschwindigkeit $74,5 \text{ m/s}$, Wasserzufuhr im Strahl $0,112 \text{ g/m}^3$. Bis zur Sättigung bei $-40,5^{\circ}$ (ca. $0,165 \text{ g/m}^3$) fehlen noch $0,053 \text{ g/m}^3$, die bei -45° , der in der ungestörten Umgebung vorausgesetzten Temperatur, einer relativen Feuchtigkeit von 50 % entsprechen.

- Wegen der nicht genauen Kenntnis der vertikalen Ausdehnung des Auspuffstrahles im letzten Teil unserer Meßstrecke ist es möglich, daß sich hier die Verhältnisse etwas ändern. Wenn der Strahl Kreisquerschnitt hätte, würden die absoluten Feuchtigkeiten im Strahl geringer sein; wenn sein Querschnitt eine noch flachere als die angenommene Ellipse wäre, würden sie größer sein als in der Rechnung angenommen wurde; da die absolute Feuchte im Strahl abnimmt mit dem wachsendem Querschnitt und umgekehrt, und die horizontal liegende große Achse ja gemessen wurde.

Zu einem ganz ähnlichen Resultat, wie es der Tabelle 3 entspricht, kommt auch Höndorf⁹⁾ auf einem ganz anderen Wege. Auch er findet die kritische Stelle, bei der zuerst Kondensation eintritt, bei ungefähr 5° Übertemperatur.

Steigt von dem Beginn des Auftretens der Auspuffwolken an die Maschine weiter, so wächst die Kondensfahne von der oben angegebenen Stelle aus rasch nach vorn und hinten, da die relative Feuchtigkeit der Luft im allgemeinen sich wesentlich langsamer als die Temperatur ändert. Wenig höher hat sie je nach der Größe der relativen Feuchtigkeit eine Länge, die zwischen einigen 10 und einigen 100 m schwankt.

Fehlerabschätzung.

Würde die Kondensation schon bei -44°C beginnen, so müßte nach obigen Rechnungen die Luftfeuchtigkeit 60 % betragen, dagegen nur 40 %, wenn sie bei -46° beginnen würde. Man sieht daraus, daß sich der Wert der relativen Feuchtigkeit jeweils um 10 Einheiten ändert, wenn der Beginn der Kondensation 1° tiefer oder höher als -45° liegt.

Um die Temperaturfehler möglichst herabzudrücken, wurden erstens die Meteorographen genauestens in einer Kältekammer geeicht, in der sie denselben Verhältnissen wie in der freien Atmosphäre unterlagen, und zweitens die Temperaturen noch auf Grund der Fluggeschwindigkeit korrigiert. Das Nachhinken betrug bei 10 Sek. Halbwertszeit des Bimetalls in der Versuchshöhe 0,2°C, was nach der Trägheitsformel:

$$T = T_0 + \alpha \frac{dT}{dt};$$

$$\alpha = \frac{\text{Halbwertszeit}}{2}$$

T_0 = gemessene Temp.

leicht zu errechnen ist. Weiterhin wurden sofort, wenn auch nur das geringste Anzeichen vom Beginn des Auftretens der Kondensation zu erkennen war, Zeitmarken angebracht. Die Durchmesser des Strahles wurden aus dem photographischen Bild mittels Lupe ausgewertet, sodaß die Fehler der obigen Rechnung zugrunde liegenden Werte auf das Mindestmaß herabgedrückt sind.



Abb. 9: Fernrohraufnahme der Ha 126 mit Kondensschweif, der erst in einigem Abstand hinter der Maschine beginnt ($f = 110$ cm).

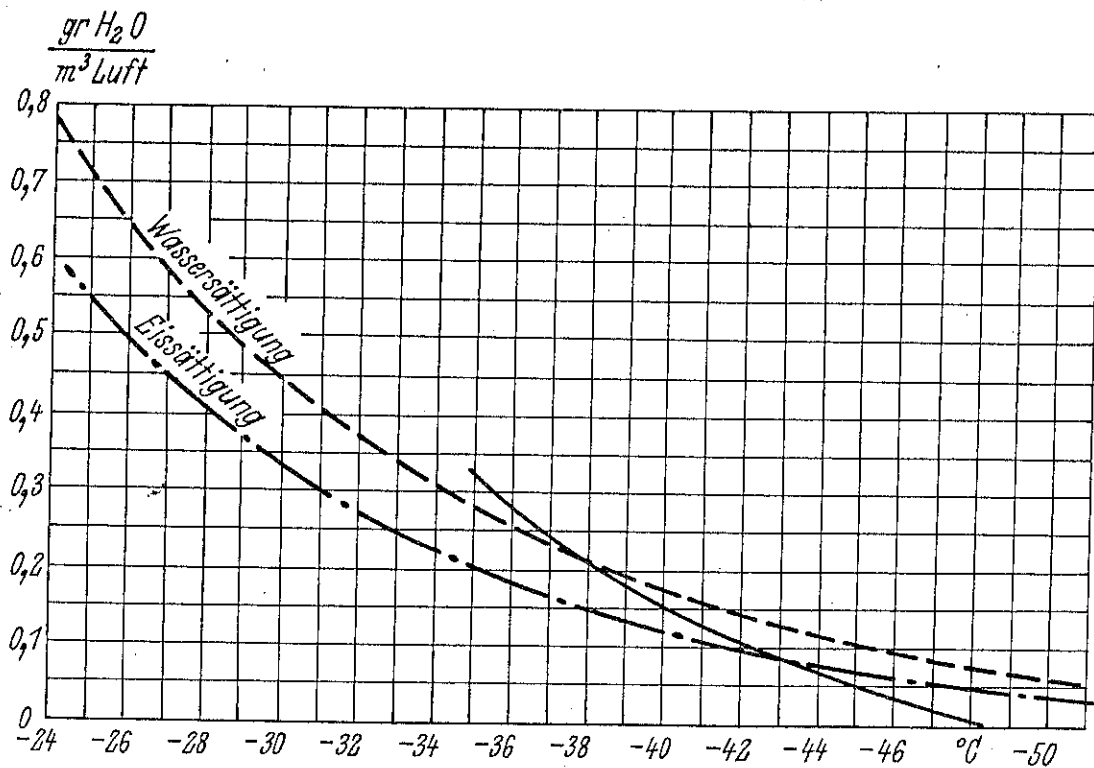


Abb. 10: Graphische Darstellung zur Berechnung des Feuchtigkeitsgehaltes in der oberen Troposphäre aus dem Beginn der Kondensfahnenbildung.

Wenn man 1.) die in der Zeiteinheit verbrannte Benzinmenge, 2.) die Verbreiterung des Auspuffstrahles, 3.) die örtliche Über-Temperatur längs des Strahles, sowie 4.) die Geschwindigkeiten im Auspuffstrahl als bekannt und bei jedem Fluge immer wieder gleich voraussetzt, so kann man aus der Temperatur der ungestörten Luft, bei der die Kondensation 10 - 20 m hinter der Maschine beginnt, auf den Wasserdampfgehalt der umgebenden Luft in dieser Höhe schließen.

Wie bereits anfangs erwähnt, sind die Bedingungen 1 und 4 in guter Näherung erfüllt. Die Abweichung von der in Abb. 8 angegebenen Übertemperatur 15 m hinter der Maschine zwischen 8000 und 10 000 m war im Mittel kleiner als $0,5^{\circ}$. Die Querschnittsänderung in dieser Entfernung kann man für den angegebenen Höhenbereich ebenfalls gleich Null setzen, sodaß man in dem Bereich zwischen etwa 8000 und 10 000 m obige Voraussetzungen als erfüllt ansehen darf. Wenn wir bei der Bestimmung der relativen Feuchte der oberen Troposphärenschichten nach der oben angegebenen Art einen Fehler von etwa $\pm 10\%$ annehmen, so werden wir den durch die Messungen und durch die Änderungen von Flug zu Flug möglicherweise hereinkommenden Fehlern gerecht werden.

Wenn man für jede Temperatur die Feuchtigkeitsmenge in g/m^3 berechnet, die in der Luft mindestens vorhanden sein muß, damit in dem Bereich etwa zwischen 8000 und 10 000 m bei der Hs 126 Kondensfahnen entstehen, so erhält man die in Abb. 10 dargestellte ausgezogene Kurve, deren formelmäßiger Ausdruck:

$$a = A(t + 4,5^{\circ}) - 0,11$$

lautet; da die Übertemperatur an der kritischen Stelle $4,5^{\circ}\text{C}$ und die durch den Auspuff zugeführte Wasserdampfmenge $0,11 \text{ g/m}^3$ beträgt. $A(t)$ = die absolute Feuchtigkeit bei $t^{\circ}\text{C}$, wenn Wassersättigung herrscht.

Dieser Kurve entnimmt man also die in der ungestörten Umgebung herrschende Feuchtigkeit im Augenblick des ersten Auftretens der Auspuffwolkenbildung, wenn die Temperatur dieser umgebenden Luft bekannt ist. Die gestrichelte Linie

ist die Sättigungskurve in Bezug auf Wasser, die strich-punktierte die in Bezug auf Eis. Das Verhältnis der Ordinaten der ausgezogenen zu den gestrichelten Kurven multipliziert mit 100 ergibt dann die relative Feuchtigkeit der Umgebung.

Die mittlere relative Feuchtigkeit in der oberen Troposphäre.

Abb. 11 zeigt die bei den durchgeführten Höhenflügen gefundene Abhängigkeit des Beginns der Kondensfahnen von der Temperatur. Auf der Ordinate ist die Zahl der Fälle, auf der Abszisse sind die Temperaturen aufgetragen. Das Maximum dieser Kurve liegt bei -45° . (Die Temperaturen sind auf ganze Grad abgerundet.) Nach links und rechts fällt sie steil ab. Auf die Temperaturen von $-43,5$ bis $-46,4^{\circ}\text{C}$ entfallen, wenn man von den Fällen über -38° ⁺⁾ absieht, etwa 70 % aller Fälle. Im Winter werden -45° in der freien Atmosphäre in unseren Breiten etwa bei 8000 m, im Sommer etwa bei 9500 m erreicht. An Hand der Temperaturen ermittelt man aus Abb. 10 die relative Feuchtigkeit in diesen Höhen zu etwa 30 - 65 %, im Mittel also rund 50 %. Bei Absinkwetterlagen an der Rückseite eines Tiefs ist sie geringer, bei Aufgleitwetterlagen an der Vorderseite größer als 50 %. Dieser Mittelwert deckt sich sehr gut mit demjenigen, den Peppler¹⁰⁾ für diese Höhen nach den Haar-Hygrometeranzeigen bei Drachen- und Ballonaufstiegen angibt. Obwohl natürlich das Haar-Hygrometer bei diesen Temperaturen sehr träge ist, registrierten auch die bei unseren Flügen mitgeführten Meteorographen Werte von etwa 50 % relativer Feuchtigkeit.

⁺⁾ In tieferen Schichten und bei höheren Temperaturen treten ebenfalls Kondensfahnen öfters auf. Allerdings entstehen sie gewöhnlich in größerem Abstand hinter der Maschine, sodaß sie nicht mehr durch die Rechnung erfaßt werden können. Da bei höheren Temperaturen die der Luft durch den Auspuff zugeführte Wassermenge relativ sehr gering ist, entstehen die Kondensfahnen nur bei sehr hohen (nah an 100 %) relativen Feuchtigkeiten. Die zugeführte geringe Wassermenge löst dann nur noch die Kondensation dieser schon in der Luft vorhandenen hohen Feuchte aus.

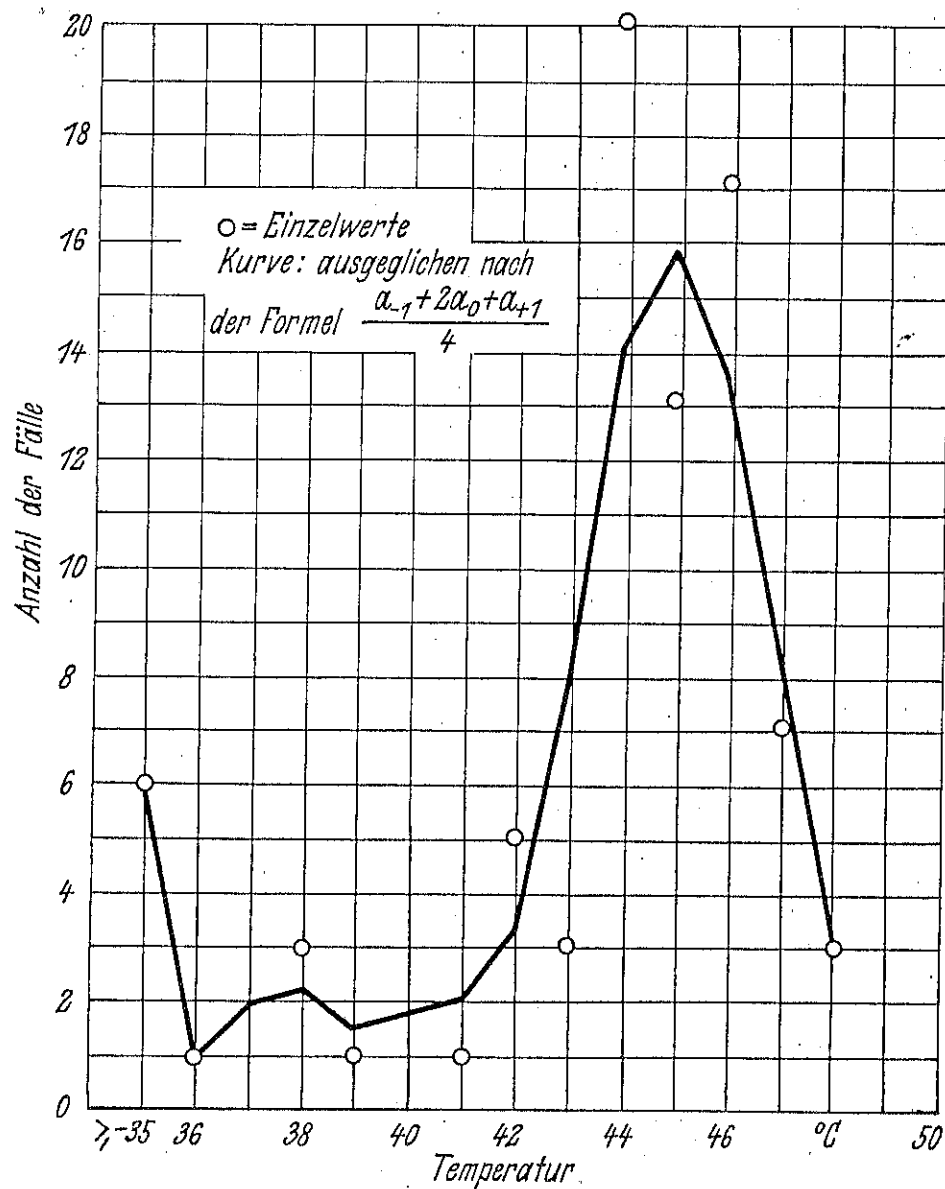


Abb. 11: Der Beginn der Kondensfahnenbildung in Abhängigkeit von der Temperatur bei den mit der Hs 126 durchgeführten Höhenflügen. (Die Temperaturen sind auf ganze Grad abgerundet.)

Bei einer Temperatur von etwa -49°C könnte die relative Feuchtigkeit der Luft 0 % betragen, d.h. völlige Trockenheit herrschen, und es müßten trotzdem Auspuffwolken entstehen, wie man aus Abb. 10 ersehen kann. Anscheinend beträgt die relative Feuchtigkeit in den großen Höhen sehr selten 10 % und weniger, denn, wie Abb. 11 zeigt, begannen nur in drei Fällen die Auspuffwolken erst bei -48°C .

Auspuffwolkenbildung bei Eissättigung.

Bei -43°C schneidet die ausgezogene Linie in Abb. 10 die Eissättigungskurve; d.h. also, daß hier die relative Feuchtigkeit der Luft in Bezug auf Eis 100 % (das sind aber, da die rel. Feuchte normalerweise auf Wasser definiert ist, R.F. = 68 %) betragen muß, damit Auspuffwolken entstehen können. Dies konnte durch die Flüge in Cirren, in denen man Eissättigung annehmen kann, bestätigt werden. Da in den Cirren die allerersten Anzeichen der Kondensation nicht beobachtet werden können, weil sich hier die ersten dünnen Schleier von der Umgebung nicht abheben, ist die Temperatur, bei der die Kondensation in Cirren begann, in den Flugprotokollen und damit in Abb. 11 etwas zu tief angegeben. Deshalb gehören manche von den zu -44°C gezählten Fälle eigentlich in den Bereich von -43° . Im folgenden sollen nun einzelne der bei den Flügen aufgezeichneten Beobachtungen (Klartexte) wiedergegeben werden, woraus zu ersehen ist, daß tatsächlich zwischen -43° und -44° der Kondensationsbeginn der Auspuffgase in Eiswolken stattfand.

2.4.40. "Bei 7600 m an Ci-Untergrenze keine Auspuffwolken, bei 8200 m in Ci keine Auspuffwolken. Ab 8400 m ($-43,8^{\circ}$) Auspuffwolken!"

26.11.41, vorm. "Bei 4800 m Ci-Untergrenze. Ab 9300 m Auspuffwolken ($-43,5^{\circ}$) Cirrenobergrenze in etwa 9800 m."

26.11, nachm. "Ab 9300 m ($-43,5^{\circ}$) entstehen in Cirren Auspuffwolken."

4.12.40. "Ab 7000 m in Cirren, ab 8400 m ($-44,0^{\circ}$) Auspuffwolken."

28.1.41, "As bzw. Cs-Decke von 1200 - 9500 m. Darin ab 7700 m ($-43,6^{\circ}$) Beginn von Auspuffwolken."

27.2.41, "Etwa ab 7500 m in Cirren, darin ab 8500 m (-44°) Auspuffwolken zu beobachten."

19.4.41, "Von 4800 bis 8600 m in Cirren. Ab 8300 m ($-43,5^{\circ}$) Auspuffwolken zu erkennen."

Man könnte diese Beobachtungen noch durch viele andere ergänzen, die aber keine neuen Gesichtspunkte mehr bringen würden.

Treten in Cirren Auspuffwolken auf, so bleiben sie gewöhnlich nicht kurz, sondern werden länger und bleiben beständig; denn die stark unterkühlten Wasserteilchen des Auspuffstrahles finden in den Cirruskristallen günstigste Kerne, an denen der labile Zustand der starken Unterkühlung ausgelöst wird und das Wasser auskristallisieren kann. Die Kondensstreifen werden in diesen Fällen aber gewöhnlich nur langsam breiter (Abb. 12) im Gegensatz zu denjenigen, die auch in diesen Höhen, aber bei höheren Außentemperaturen entstehen.

Theorie der Tropfen- und Kristallbildung.

Überschreitet die ausgezogene Kurve in Abb. 10 die Eissättigungsgrenze, so erreicht sie das Gebiet der Frost-übersättigung, einen Zustand, der in der Atmosphäre öfters auftritt. Diese Tatsache ist nicht nur für die Meteorologie, sondern auch für gewisse motortechnische Fragen wichtig, und dieses Problem wird im folgenden behandelt werden. Bevor davon aber Beispiele gebracht werden, soll zum besseren Verständnis zuerst die Theorie der Kondensation und Sublimation des Wasserdampfes besprochen werden.

In letzter Zeit haben Krastanow^{11, 12)} und Wall¹³⁾ Arbeiten veröffentlicht, in denen sie im Wesentlichen eine grundlegende Arbeit von M. Volmer: "Kinetik der Phasenbildung"¹⁴⁾ in die Sprache der Meteorologie übersetzten. - Seit den qualitativen Überlegungen von A. u. K. Wegener¹⁵⁾ über die den verschiedenen Graden der Übersättigung entsprechenden Formen der Eiskristalle in der Atmosphäre sind

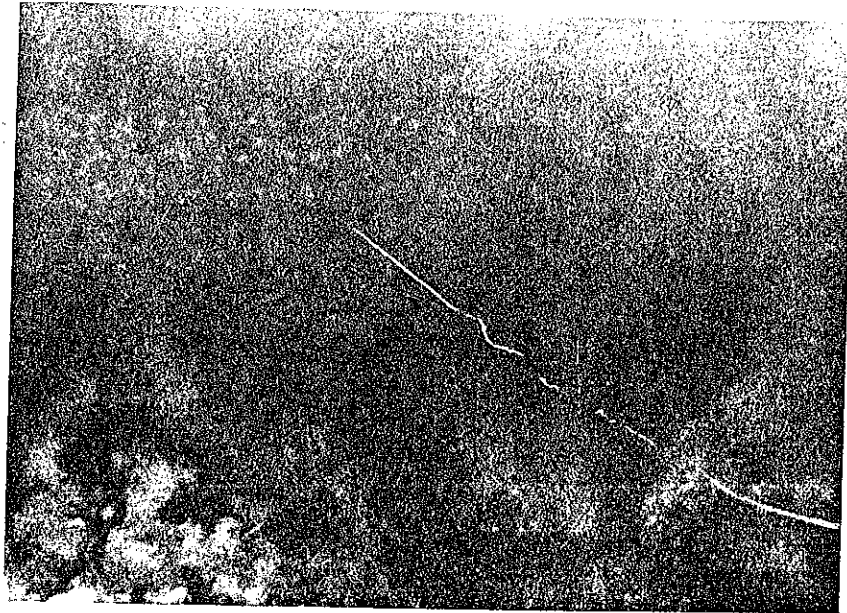


Abb. 12: nur wenig verbreiterte Kondensfahne in Cirren.

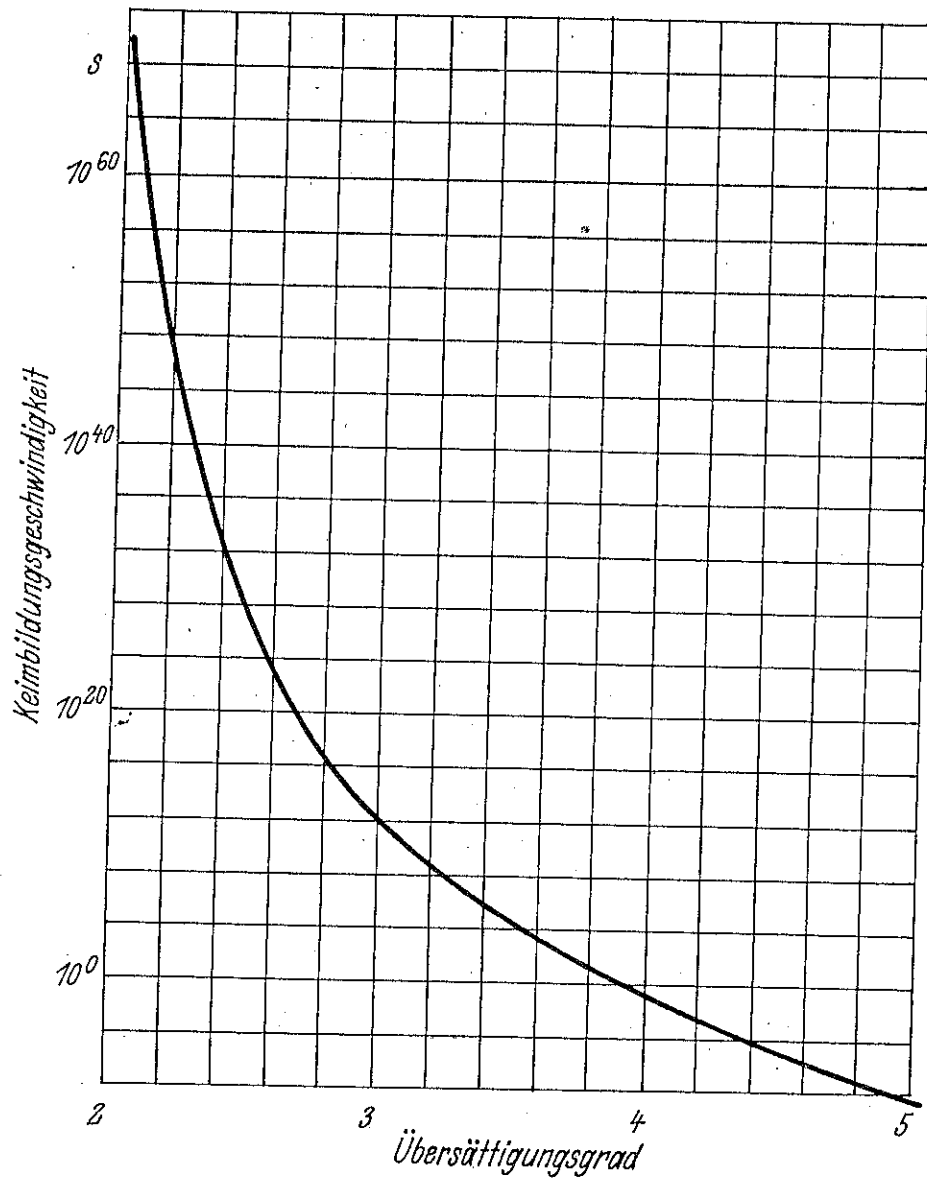


Abb. 14: Die mittleren Keimbildungsgeschwindigkeiten in Abhängigkeit vom Übersättigungsgrad.

in der letzten Zeit trotz sehr wertvoller Arbeiten von Findeisen^{16, 17)} und H.Köhler¹⁸⁾ auf diesem Gebiet keine wesentlich neuen Gesichtspunkte hinzugetreten. Es war ein gewisser Stillstand eingetreten. Dieser wurde durch die quantitativen Ausführungen von Volmer beendet. Da die Rechnungen in dem Buch von Volmer ausführlich dargelegt sind, sollen hier nur kurz die wesentlichen Resultate zusammengestellt werden.

Zur Bildung eines wachstumsfähigen Tropfens oder Kristalls aus der reinen Dampfphase, der mit seiner Umgebung im Dampfdruckgleichgewicht stehen soll, ist eine Arbeit W notwendig, die gegeben ist durch:

$$1.) \quad W = \frac{1}{3} \sigma O$$

wobei σ die Grenzflächenenergie dieses Keimes (unter Keim verstehen wir einen durch weitere Molekülaufnahme ohne Arbeitsaufwand wachstumsfähigen Tropfen oder Kristall) und O die Oberfläche bedeutet. Bei einem Tropfen ist die Oberfläche $= 4\pi r^2$, sodaß hier die Arbeit

$$W = \frac{4\pi\sigma r^2}{3}$$

ist.

Da der Keim bei Kristallen keine Kugelform hat, sondern irgendwie anders gestaltet ist, können wir allgemein schreiben:

$$2.) \quad W = \frac{\sigma r^2}{3} \omega$$

wobei r der Radius der dem Kristall eingeschriebenen Kugel und ω ein geometrischer Faktor ist, dessen Größe für die Kugel den Wert 4π , für den Würfel z.B. 24 hat.

Die bekannte Thomson-Gibbs'sche Gleichung, die den Dampfdruck über einem Tropfen in Abhängigkeit von seinem Radius r angibt, lautet:

$$p_r = p_\infty \cdot e^{\frac{2\sigma M}{d \cdot R \cdot T \cdot r}}$$

oder nach r aufgelöst:

$$3.) \quad r = \frac{2 \cdot \sigma \cdot M}{d \cdot R \cdot T \cdot \ln \frac{p_r}{p_\infty}}$$

Hierin bedeuten M das Molekulargewicht des Dampfes, R die Gaskonstante, T die absolute Temperatur, d die Dichte der kondensierten Phase, P_{∞} den Dampfdruck über der ebenen Oberfläche dieser kondensierten Phase und p_r den Dampfdruck über der gekrümmten Fläche des Tropfens.

Setzt man den Ausdruck für r in Gleichung 2.) ein, so erhält man als Arbeit für die Bildung eines Keimes vom Radius r, der sich bei dem herrschenden Dampfdruck p_r im Gleichgewichtszustand befindet:

$$4.) \quad W = \frac{4 \cdot \omega \cdot M^2 \cdot \sigma^3}{3 \cdot R^2 \cdot d^2 \cdot T^2 \cdot (\ln \frac{p_r}{p_{\infty}})^2}$$

Je größer die Übersättigung $\frac{p_r}{p_{\infty}}$ ist, um so weniger Arbeit ist notwendig, um einen Keim aus der homogenen Phase zu bilden. (Ist nur Sättigung ($p_r = p_{\infty}$) vorhanden, so ist W unendlich groß, d.h. es kann sich kein Keim bilden.) Weiter können wir sagen: Je mehr Energie für die Bildung eines Keimes notwendig ist, um so geringer ist die Wahrscheinlichkeit, daß einer gebildet wird, d.h. um so weniger Kerne entstehen in der Zeiteinheit. Formelmäßig drückt dies Volmer folgendermaßen aus:

$$5.) \quad J = A \cdot e^{-\frac{W}{k \cdot T}}$$

Hierin bedeuten I die Keimbildungsgeschwindigkeit, die angibt, wieviel Keime in der Sekunde entstehen, k die Boltzmann'sche Konstante = $1,379 \times 10^{-16}$ erg.Grad⁻¹. A hängt wenig von Temperatur und Druck ab und $= Z_1 \cdot S_1 \cdot O_1 \approx 10^{25}$ für eine Sekunde und 1 cm³. Z_1 ist die Zahl der einzelnen Moleküle im cm³, S_1 die sekundliche Stoßzahl der Wasserdampfmoleküle auf 1 cm² multipliziert mit dem Kondensationskoeffizienten und O_1 die Oberfläche eines Moleküls.

In der Zeit t entstehen I . t Kerne.

Will man nun ausrechnen, bei welcher Übersättigung in einem cm³ und in einer Sekunde ein Keim aus homogenem Wasserdampf entsteht, also I . t = 1 ist, (bei dieser Keimbildungsgeschwindigkeit wird etwa die Kondensation im Experi-

++)

ment sichtbar⁺) so erhält man aus 4.) und 5.) eine Gleichung für

$$6.) \quad P_r = P_\infty \cdot e^{\frac{2 \cdot M \cdot \sigma}{R \cdot d \cdot T} \cdot \sqrt{\frac{\sigma \cdot \omega}{3 \cdot k \cdot T \ln A}}}$$

Da man $\frac{\sigma^3}{d^3}$ in erster Näherung konstant setzen kann, und auch P_∞ nur von der Temperatur abhängt, läßt sich also P_r in Abhängigkeit nur von der Temperatur schreiben. Graphisch dargestellt ist diese Gleichung in Abb. 13 als die mit $W_{P_{kr}}$ bezeichnete Kurve. Die aus dem homogenen Wasserdampf pro Sekunde und cm^3 auf der Kurve $W_{P_{kr}}$ entstehenden Tröpfchen wollen wir als Urkeime bezeichnen. Die Größenordnung ihrer Radien liegt etwa bei $5 \cdot 10^{-8} \text{ cm}$.

Volmer hat für folgende zwei Beispiele die Übersättigung für Tröpfchenbildung aus homogenem Wasserdampf berechnet:

$$\begin{aligned} 1.) \quad T_{1.}) &= 275,2 \\ &= 75,23 \\ d &= 1 \\ M &= 18 \\ t &= 1/2 \text{ sec.} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} 2.) \quad T_{2.}) &= 261,0 \\ O_2 &= 77,28 \end{aligned}$$

und erhält für $\frac{P_r}{P_\infty} = 4,16$ bzw. $4,96$. Die bei gleichen Verhältnissen von H.Flood¹⁴⁾ experimentell festgestellten Werte sind $4,21$ bzw. $5,03$. Die sehr gute Übereinstimmung der Rechnung mit dem Experiment spricht für die Richtigkeit der Volmer'schen Theorie über die Bildung der Wassertröpfchen. Die obigen Zahlen zeigen, daß erst bei 4 - 5facher Übersättigung⁺⁺) aus homogenem Wasserdampf Keime mit einer Bildungsgeschwindigkeit von 2 pro sec. und cm^3 entstehen.

⁺) In der Atmosphäre kann man besonders bei - durch Sublimation entstandenen - Eiswolken I kleiner annehmen, damit diese als Wolke erscheinen. Zu einem kleineren I aber gehört eine kleinere Übersättigung.

⁺⁺) Mit abnehmender Temperatur wachsen die notwendigen Übersättigungen stark an.

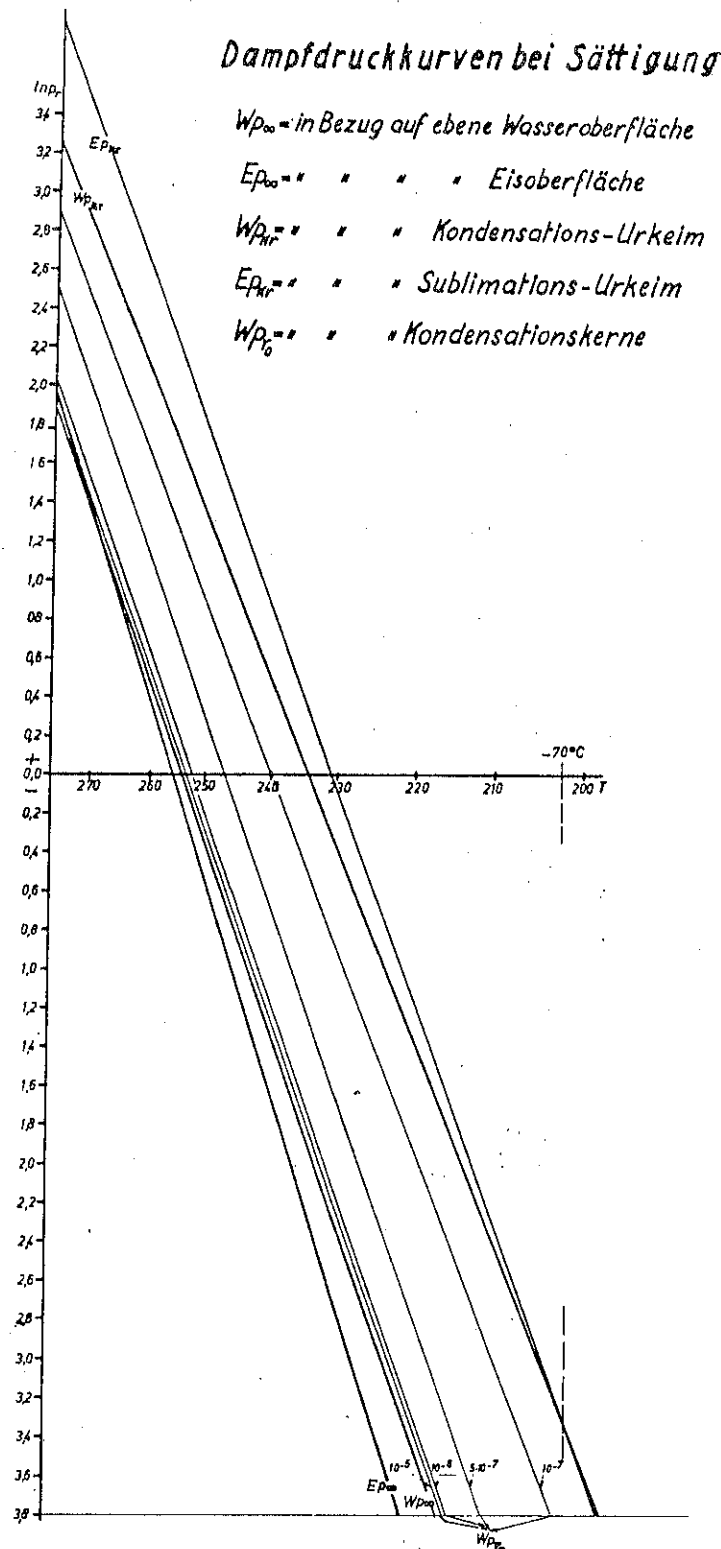


Abb. 13: Aus den Dampfdruckkurven kann man erkennen, daß, je größer die Kondensationskerne sind, um so kleiner die Übersättigung für die Tropfenbildung zu sein braucht.

Es sind Keime, die nur wenig kleiner als die vorhin betrachteten Urkeime sind, weil ja zur größeren Keimbildungsgeschwindigkeit eine größere Übersättigung und damit bei festgehaltenem T und p_{∞} nach 3.) ein kleineres r gehört.

Während für Kondensation die aufgestellte Theorie sehr gut mit dem Experiment übereinstimmt, ist es z.Zt. wegen Unkenntnis der σ -Werte nicht möglich, diese Übereinstimmung bei Sublimation zu erzielen. Man kann nur in erster Näherung für Eis das gleiche σ und das gleiche d einsetzen wie für Wasser. Dann unterscheidet vom Tröpfchen allein noch der Faktor ω . Unter der vereinfachenden Annahme der Würfelform entsprechend dem Ansatz bei Volmer ist $\omega = 24$. Setzt man diesen Wert in die Gleichung der Keimbildungsgeschwindigkeit ein, so erhält man in erster Näherung die mit $E_{p_{kr}}$ in Abb. 13 bezeichnete Dampfdruckkurve.^{+) Die Dampfdruckkurve über einer ebenen Eisfläche ist mit $E_{p_{\infty}}$ eingezeichnet.}

Wesentlich ist nun die grundsätzliche Lage der beiden Kurven $W_{p_{kr}}$ und $E_{p_{kr}}$ zueinander. Aus ihr ersieht man, daß beim Unterkühlen von homogenem Wasserdampf, der frei von jeder Verunreinigung ist, bis zu sehr tiefen Temperaturen (in dieser Darstellung etwa -70°C ; bei Krastanow, der die Kurven ebenfalls für Würfelform des Kristalls und unter kleinen Vernachlässigungen berechnete, bis etwa -65°C) immer zuerst die Kurve $W_{p_{kr}}$ erreicht wird, also zuerst Wasser entsteht. Der Grund dafür liegt in dem geringeren Energieaufwand bei der Tropfenbildung im Gegensatz zu demjenigen bei der Eisbildung, wegen des kleineren ω bei Wasser. Erst ab -70°C trifft man zuerst auf $E_{p_{kr}}$, d.h. bei Unterkühlung von homogenem Wasserdampf können erst ab etwa -70°C Eiskristalle unmittelbar aus der Dampfphase entstehen.

Ist ein Tröpfchen erst einmal gebildet, so genügt dann nur eine sehr geringe weitere Übersättigung seiner Umgebung, um es spontan ohne Arbeitsaufwand weiterwachsen zu lassen.

^{+) In Wirklichkeit sind die in Abb. 13 dargestellten Kurven leicht gekrümmt. In erster Näherung kann man sie aber als Gerade zeichnen.}

Zur Bildung ist aber eine große Übersättigung notwendig. Diese Energieschwelle muß erst erreicht werden, damit das Tröpfchen ohne Energieaufwand weiterwachsen kann.

In der Troposphäre - auch in ihrem oberen Teil - treten solche große Übersättigungen nicht auf. Der Verfasser kann deshalb die Ansicht von Krastanow¹¹⁾ nicht teilen, wonach "es sehr wahrscheinlich ist, daß in den oberen Troposphärenschichten die Kondensation an Ionen stattfindet", denn dazu wäre eine etwa 6 - 10-fache Übersättigung notwendig. Die durchgeführten Höhenflüge erbrachten dafür, wie noch später berichtet wird, keinerlei Anhaltspunkte. Die Atmosphäre enthält alle möglichen Partikelchen, welche als Kondensationskerne dienen und die Tropfenbildung schon bei geringeren Übersättigungen eintreten lassen. Diese Partikelchen sind die sogenannten Kondensationskerne.

Die Rolle der Kondensationskerne.

"Eine vom Wasser benetzbare Wand wirkt so, wie die Wasseroberfläche selbst"¹⁹⁾. Desgleichen wirkt ein von Wasser benetzbares Teilchen wie ein Tröpfchen von der Größe dieses Teilchens. Diese Wirkung hat es schon, wenn der Wasserdampf seiner Umgebung noch nicht ganz gesättigt ist, weil sich schon dann eine ganz dünne Wasserhaut auf ihm bildet. Um dieses "Tröpfchen" dann weiterwachsen zu lassen, ist nur noch eine seinem Radius entsprechende Übersättigung notwendig. Die Energieschwelle liegt hier also bei einer geringeren Übersättigung als sie für die Bildung eines Tröpfchens aus homogenem Wasserdampf nötig ist.

Soll bei einem bestimmten - dem Radius r entsprechenden - Dampfdruck ein Tröpfchen mit diesem Radius gebildet werden, und ist schon ein wasserbenetzbares Teilchen mit dem kleineren Radius r_0 vorhanden, so ist nur noch die Arbeit

$$W_a = \frac{4\pi(r-r_0)^2 \sigma}{3}$$

notwendig.

In Abb. 13 sind in Anlehnung an Krastanow für verschiedene Kondensationskerngrößen die den jeweiligen Übersättigungen entsprechenden Dampfdruckkurven als Wp_r eingezeichnet. Man sieht, daß sich die Kurven bei größer werdendem Radius der Kerne sehr rasch der Dampfdruckkurve Wp_∞ nähern, und daß sie bereits bei Größen von 10^{-6} - 10^{-5} cm fast mit dieser zusammenfallen; d.h. daß bei diesen Größen, die auch etwa denen der Kondensationskerne in der freien Atmosphäre entsprechen, die kritische Übersättigung nur noch gering zu sein braucht, um ein Tröpfchen zu bilden.

Sublimationskerne.

a) Theorie.

Ähnliche Dampfdruckkurven wie für die Kondensation könnte man auch für die Sublimation zeichnen, wenn - ihrer Form und Größe nach bekannte - Eisteilchen oder isomorphe Partikelchen als Kerne vorhanden wären. Die Schnittpunkte dieser "Eiskurven", mit den - für die gleiche Kerngröße gezeichneten - "Wasserkurven" rücken dann mit Größerwerden der Kerne in das Gebiet höherer Temperaturen und Dampfdrucke, d.h. bei größeren Kernen würden schon bei höheren Temperaturen als -70° Kristalle entstehen. Theoretisch ist dieser Gedankengang einfach durchzuführen. Die Resultate stimmen aber mit dem Experiment nicht überein.

b) Experiment.

Es wurde schon erwähnt, daß wegen der Unkenntnis von σ die Lage bzw. Neigung der Dampfdruckkurve für Eiskristalle, die aus homogenem Wasserdampf gebildet werden, sehr ungewiß ist. Aus diesem Grunde hat auch Volmer, wie er dem Verfasser anlässlich einer persönlichen Unterredung mitteilte, vermieden, die Maßstäbe an die der Abb. 13 entsprechenden Figur in seinem Buche einzutragen. Das Experiment rechtfertigt diese Maßnahme Volmers. Denn sowohl Prof. Dr. Regener, wie der Verfasser und seine Mitarbeiter Frl. Dipl. Ing. U. Pielsticker und Herr Dr. H. Weickmann

erhielten bei raschem Expandieren in der Expansionskammer immer zuerst Tropfen, obwohl die Luft im Expansionsraum auf -80°C und tiefer abgekühlt wurde. Tropfenbildung trat auch ein, wenn feste Teilchen schwebend in diesem Raum vorhanden waren. So wurden u.a. kleine Brandsätze darin abgebrannt, die sehr viele feste Teilchen lieferten. Aber immer bildeten sich Wassertröpfchen an den ~~1~~starken Spinnfäden, die in der Kammer der D.F.S. unter dem Mikroskop gezogen waren. Selbst nach Einführen von Quarzstaub konnte keine Eisbildung, sondern nur Tropfenbildung festgestellt werden. Interessant war, daß selbst auf Flächen (an der Glaswand) sich noch bis zu Temperaturen von -20° und oft noch wesentlich tiefer Tröpfchen bildeten und einige Zeit hielten. Über diese Untersuchungen wird später, wenn sie abgeschlossen sind, ausführlicher berichtet werden. Die bisherigen Versuche zeigen aber schon, daß die Voraussetzungen, unter denen die Dampfdruckkurve $E_{p_{kr}}$ gezeichnet ist, den tatsächlichen Verhältnissen nicht entsprechen. Die gleiche Feststellung trifft erst recht für die Dampfdruckkurven zu, die man für verschiedene Sublimationskerngrößen zeichnen würde. Denn sie würden nicht nur die gleichen Voraussetzungen wie $E_{p_{kr}}$ enthalten, sondern man setzte hier noch zusätzlich außer der Gültigkeit der Thomson-Gibb'schen Gleichung für Eiskristalle Isomorphie der Sublimationskerne voraus.

Sind also in der Luft dem Eis nicht genau, sondern nur annähernd isomorphe Kerne von bestimmter Größe vorhanden, so würde, da diese meistens durch Wasser benetzbar sind, also auch als gute Kondensationskerne dienen, die Kurve in Bezug auf Tröpfchenbildung ihre der Größe der Teilchen entsprechende Lage beibehalten, die Kurve in Bezug auf Eisbildung aber weiter in Richtung abnehmender Temperatur verschoben sein als es derjenigen für vollkommen isomorphe Kerne der gleichen Größe entsprechen würde; da die kritische Übersättigung bei den nicht isomorphen Kernen natürlich größer sein muß als bei vollkommen isomorphen. Dadurch kommt aber auch der Schnittpunkt der beiden Kurven Eis - Wasser, bzw. die Temperatur, bis zu der

bei Expansion zuerst Wasser entsteht, wieder in den Bereich tieferer Temperatur zu liegen.

Da aber in der Atmosphäre die sogen. Sublimationskerne, vor allem im oberen Teil der Troposphäre, sicher nur mehr oder weniger isomorph sind, ist deshalb auch die Grenztemperatur, die Krastanow in seiner Arbeit¹¹⁾ zwischen Eis- und Wasserwolken mit -13° angibt, und mit der Wirklichkeit öfters gut übereinstimmt, nur auf die Wahl der Größe der Sublimationskerne zurückzuführen, exakt aber nicht begründet. Wie man aus Abb. 13 ersieht, verursacht eine kleine Größenänderung des Radius eine starke Verschiebung der Dampfdruckkurven. Die Temperaturwerte, die er in seiner zweiten Arbeit¹²⁾ als Grenze zwischen Eisbildung aus Wassertropfen und Eisbildung durch direkte Sublimation angibt, haben deshalb auch nur qualitativen Wert, was ja Krastanow selbst auch schreibt.

Die Rolle der Keimbildungsgeschwindigkeit in der Atmosphäre.

In den vorigen Abschnitten wurde gezeigt, daß in homogenem Wasserdampf bei etwa 4 - 5facher Übersättigung Tropfenbildung einsetzt. Sind genügend große Kondensationskerne vorhanden, so tritt die Tropfenbildung schon bei geringeren Übersättigungen ein. Die Bildung der Tröpfchen ist in beiden Fällen spontan. Nun bilden sich aber bei geringerer als 4 - 5facher Übersättigung aus homogenem Wasserdampf auch Tröpfchen. Nur ist dann die Bildungsgeschwindigkeit geringer. Setzt man in Gleichung 5.)

$$J = 10^{25} \cdot e^{-\frac{W}{kT}}$$

bei einem bestimmten T (z.B. $= 300^{\circ} \text{K}$) in W verschiedene Werte der Übersättigung ein, so erhält man die in Abb. 14 dargestellten Keimbildungsgeschwindigkeiten: danach dauert es bei Sättigung (rel. Feuchte 100 %), wie bereits erwähnt, unendlich lang, bis ein Keim entsteht. Bei 2facher Übersättigung würden durchschnittlich 10^{62} , bei 3facher immer noch mehrere tausend Jahre vergehen, bis ein Keim im cm^3 gebildet würde. Wird die Übersättigung dann größer, so wächst die Keimbildungsgeschwindigkeit. Bei etwa 3,5facher

Übersättigung beträgt sie nur noch durchschnittlich 3 Stunden, und bei ungefähr 3,9-facher Übersättigung wird dann $I = 1$, also pro Sekunde und cm^3 ein Keim gebildet. Zwischen 4- und 5-facher Übersättigung wächst die Anzahl der Keime, die sich sekundlich im cm^3 bilden, gleich auf mehrere Millionen an. Dieses plötzliche Anwachsen der Keimzahl im cm^3 stellt eine scharfe - die kritische - Grenze dar.

Wir sehen also, daß sich ein Keim zwar bei jeder Übersättigung bilden kann, daß aber dazu mehr oder weniger Zeit notwendig ist, je nachdem, wie weit der Dampfdruck vom kritischen entfernt ist. Sind Kondensations- oder isomorphe Sublimationskerne vorhanden, so dürfte der Gedankengang derselbe sein, nur daß in diesem Fall die kritische Übersättigung entsprechend der Korngröße geringer ist. Bei nicht vollständig isomorphen Kernen tritt erst wieder bei höherer Übersättigung als bei isomorphen die Sublimation ein. Ist deshalb in der Umgebung eines nicht isomorphen Kernes die für einen isomorphen Kern von gleicher Größe notwendige kritische Übersättigung erreicht, so darf man wohl annehmen, daß auch an jenem erst nach einiger Zeit ein Eiskristallkeim entsteht. Je günstiger die Struktur und Gestalt des Kernes ist, um so kürzer wird diese Zeit sein.

Als Beispiel für das eben Gesagte nehmen wir an, daß ein Luftquantum mit einer gewissen Geschwindigkeit - bei einer Anfangstemperatur von unter 0° - abgekühlt wird. Nach einiger Zeit ist der Sättigungsdruck in Bezug auf Eis erreicht. Sind isomorphe Sublimationskerne vorhanden, so wird je nach ihrer Größe, die etwa zwischen 10^{-4} und 10^{-6} cm liegen möge, sehr bald bei weiterem Abkühlen Sublimation eintreten. Sind die Sublimationskerne dem Eiskristall nicht isomorph, so wird es bei dieser Unterkühlung zunächst nicht zur Sublimation kommen, da die Dampfdruckkurve für den nicht isomorphen Kern bei tieferen Temperaturen liegt als die für den isomorphen von gleicher Größe. Bei größerer Unterkühlungsgeschwindigkeit wird dann nach kurzer Zeit der Sättigungsdampfdruck in Bezug auf Wasser erreicht sein, und es werden sich, da hierfür nur eine kleine Energie not-

wendig ist, kurz nach Überschreitung dieser Grenze sehr viele Tröpfchen an den vom Wasser benetzbaren Kernen bilden. Bei sehr kleiner Abkühlungsgeschwindigkeit wird aber die geringe Keimbildungsgeschwindigkeit für die Eiskristallkeime genügen, um vor Erreichen der Wassersättigung Kristalle zu bilden. Wegen der großen Verschiedenheit der Anzahl, Struktur, Form, Größe usw. der Kerne werden die Bildungszeiten von Fall zu Fall verschieden groß sein.

Durch folgende Beobachtungen im Laboratorium und der Atmosphäre soll nun die eben dargelegte Theorie bestätigt werden.

Konvektionswolken.

In der Expansionskammer gehen die Unterkühlungen und damit auch das Anwachsen der Übersättigungen sehr rasch vor sich, in Bruchteilen einer Sekunde. Es kommt hier, wie bereits berichtet, auch bei sehr tiefen Temperaturen praktisch nie sofort zur Sublimation, sondern erst zur Kondensation, und das trotz des Vorhandenseins von Quarzstaub, den man bisher als günstigen Sublimationskernspender ansah. In der Atmosphäre sind auch bei tieferen Temperaturen alle Konvektionswolken, bei denen die adiabatische Abkühlung im Gegensatz zu den Schichtwolken verhältnismäßig sehr rasch vor sich geht, Wasserwolken. So konnten bei den Flügen der D.F.S. öfters bei -35° und tiefer Wasserwolken einwandfrei festgestellt werden, auf denen eine mehrfache bunte Glorie und ein weißer Nebelbogen zu sehen waren. Beide Anzeichen deuten auf die einwandfreie Wasserstruktur hin. Zu diesen Wasserwolken gehören Cumulus⁺), Alto-Cumulus, Alto-Cumulus-lenticularis und sicher auch Cirro-Cumulus. Bei seinem Föhnflug auf 11 400 m am 11.10.40 beobachtete z.B. der meteorologisch gut geschulte Flugzeugführer Klöckner auf der Vorderkante der hohen Föhnwoge (Lenticularis-Wolke) zwischen 8000 und 9000 m bei einer Temperatur von -35 bis -40°C eine farbenprächtige Glorie;

⁺) Bei einigen Flügen wurden Cumulus-Türme durchflogen, die nach Durchstoßen einer Cirrusdecke in 9500 m bei etwa -50° noch aus Wassertröpfchen bestanden.

auf den Nebelbogen hatte Klöckner nicht geachtet. Die Vertikalgeschwindigkeiten betrugen in dieser Höhe noch 2 - 5 m/sec. Weiter schreibt Klöckner in einem Flugbericht vom 2.5.39: "Nach einiger Zeit, ich war in 7000 m angekommen, (etwa -35°) bildete sich plötzlich um mich herum eine Wolke. Die Instrumente beschlugen sich mit einer Eiskruste, was ich auch durch das inzwischen geöffnete Fenster an der Fläche feststellte. Weit über mir (in etwa 10.000 m) bildeten sich Cirro-Cumuli. Die Vertikalgeschwindigkeit in 7000 m betrug 3 - 5 m/sec." - Küttner²⁰⁾ schreibt über einen Flug von Ziller. "Zwischen 6000 und 7000 m mußte eine geschlossene Kondensationsschicht im Blindflug durchstiegen werden. ... eine ausgeprägte Moazagotl-Bildung mit über 9000 m Basishöhe konnte Ziller wegen Blindflugschwierigkeiten (Vereisung) nicht mehr ausnutzen.

In beiden Fällen vereisten die Maschinen. Also auch hier entstanden wieder bei tiefen Temperaturen in schnell aufsteigendem Luftstrom Wasserwolken. Die Zeit zwischen Eis- und Wassersättigung reichte nicht aus, um Kristalle zu bilden. Deshalb kam es, da die Wassersättigung überschritten war, zur Tröpfchenbildung.

Die Umbildung von unterkühlten Tröpfchen in Eiskristalle.

Die Arbeit für den Übergang von unterkühlten Wassertropfen zu Eiskristallen ist wesentlich geringer, als die für den Übergang von Dampf zum festen Aggregatzustand, da zwischen Wasser und Eis die Grenzflächenenergie geringer ist, als zwischen Wasserdampf und Eis. Aus diesem Grunde bilden sich die unterkühlten Wasserwolken mit der Zeit in Eiswolken um. Man kann diesen Übergang vom Boden aus öfters beobachten. Die Umwandlung der Wasserwolke bis zur Fallstreifenbildung, - daran erkennt man die Vereisung - dauert einige Minuten bis wenige Stunden. Das hängt wieder von der Kernstruktur und der Temperatur ab. Je günstiger die Kernstruktur ist, umso kürzer wird die Beständigkeit der Wasserwolke sein.

Advektionswolken.

Bei der Bildung von Advektionswolken (Schichtwolken) betragen die Vertikalgeschwindigkeiten nur wenige cm/sec., d.h. sie sind um eine bis zwei Zehner-Potenzen geringer als die bei den Konvektionswolken. Deshalb dauert es mehrere Stunden, bis nur wenige 100 m durchgestiegen sind. Nehmen wir an, daß ein Luftteilchen bei 400 mb und -35°C 72 % in Bezug auf Wasser gesättigt sei; das entspricht etwa der Eissättigung. Damit in dieser Luft Sättigung in Bezug auf Wasser herrschen soll, müßte sie noch um etwa $2,2^{\circ}$ abgekühlt werden, also - adiabatische Zustandsänderungen vorausgesetzt - 220 m emporsteigen. Beträgt die Steiggeschwindigkeit 2 cm/sec. so brauchte das Teilchen, um diesen Höhenunterschied zu durchsteigen, mehr als 3 Stunden. Dabei ist vorausgesetzt, daß der Radius der mitgeführten Kerne nicht kleiner als 10^{-4} cm ist. Ist er kleiner, was meistens der Fall sein dürfte, wäre entsprechend der stark gekrümmten Oberfläche noch eine mehr oder weniger geringe Übersättigung zur Bildung eines Tröpfchens notwendig. Dazu bedürfte es aber einer stärkeren Abkühlung, also größerer Hebung und damit noch längerer Zeit. Währenddessen aber hat der Wasserdampf sehr leicht Gelegenheit an irgend einer günstigen Stelle der festen, von Wasser benetzbaren Teilchen, Kristallkeime zu bilden. Da die Schichtwolken bei tiefen Temperaturen ($\sim -15^{\circ}$) größtenteils aus Eis bestehen, kann man annehmen, daß Zeitspannen von dieser Größenordnung genügen, um in der freien Atmosphäre bei dieser Temperatur direkt aus dem Dampf Kristalle zu bilden.

Die oben dargelegten Annahmen erfahren noch eine weitere Bestätigung in dem Auftreten von Kondensfahnen unmittelbar hinter dem Flugzeug schon bei etwa -38° , wofür, wie wir aus Abb. 10 sahen, Frostübersättigung notwendig ist.

Kondensfahnenbildung in frostübersättigten Schichten.

Vorerst sollen wieder einige Prolokollauszüge gebracht werden:

21.2.40: "In den Ci, in denen ein 22° Halo, ein 46° Halo und eine Nebensonne zu sehen sind, beginnt die Kondensfahnenbildung. Der Wolkenschweif verbreitet sich sehr rasch. Die Cirren sind sehr verschieden dicht (Fallstreifen?)." (Vom Boden aus wurde die Verdichtung der Cirren besonders vermerkt.)

15.11.39: "Hart unter der Cirrenobergrenze erste Auspuffkondensation. Unter und in den Cirren böig. Die Teilchen der Cirren sind groß."

22.2.40: "Die Menschel und eine Maschine knapp über ihr bilden sehr starke Auspuffwolken, die sich rasch verbreitern und lange Fallstreifen haben. Das Gebiet des Auftretens ist horizontal begrenzt. Es bilden sich an dieser Stelle in kurzem Zeitraum natürliche Wolken." Aus der Bildserie vom 22.2.40 (Abb. 15) sieht man an dem schnellen Auftreten der natürlichen Wolken in der gleichen Höhe - vgl. Stelle a - und dem Dichterwerden - bei b -, daß stärkere Vertikalbewegungen vorhanden gewesen sein müssen.

10.12.40: " -39° , 7400 m, Beginn von Auspuffkondensation, in 7600 m Auspuffwolken beständig. Etwa in 8000 m unscharfe Untergrenze einer Wolke, auf der eine deutliche dreifache farbige Glorie zu beobachten ist. Der Radius des 2. "Rot" ist etwa $2 - 3^{\circ}$..." Das Bodenprotokoll zu diesem Flug lautet: "Es sieht aus, als ob sich an gleicher Stelle, wo die beständige Kondensfahne auftritt, Wolken bilden."

6.3.40: "Ab etwa 7000 m (ca. -40°C) beständige Auspuffwolken. In der Umgebung ist es sehr stark dunstig; es kann sich auch um die ersten Anzeichen einer Wolkenbildung handeln. Die Auspuffwolken werden schnell breiter."

In diesen Klartexten werden immer wieder die oft rasche Bildung, bzw. das rasche Dichterwerden von natürlichen Wolken in deren Bereich die Auspuffwolken auftraten, erwähnt. Weiterhin betonten die Beobachter die Böigkeit und Fallstreifenstruktur. Das sind alles Merkmale, die direkt oder indirekt auf Vertikalbewegungen in diesen Gebieten deuten. Hatten wir bisher das Auftreten der Kondensstreifen in Cirren erst ab -43° kennen-gelernt, so traten

sie in den eben beschriebenen Cirren, die alle mehr oder weniger Fallstreifenstruktur hatten oder in kürzerer Zeit sehr dicht wurden, schon bei etwa -38 bis -40° auf.

Ehe wir auf eine Erklärung dieser Erscheinung eingehen, seien noch einige Beobachtungen erwähnt: Die Eisfallstreifen entstehen bekanntlich entweder durch Ausschneiden von Wolken, die ehemals aus Wassertropfen bestanden, oder durch Ausfallen von innerhalb einer Eiswolke besonders groß gewordener Eisteilchen. An der Untergrenze und auch noch im unteren Teil dieser Fallstreifen ist es stärker böig. Die Beschleunigungen betragen im Durchschnitt $0,1$ bis $0,5$ g, und können sogar $0,5$ bis 1 g erreichen. (Über die Beschleunigungsmessungen wird an anderer Stelle ausführlicher berichtet werden.) Diese Böigkeit hat ihre Ursache darin, daß die Teilchen der Fallstreifen und die sie umgebende Luft kälter sind als die übrige horizontale Umgebung. Dadurch wird der Temperaturgradient in der Schicht unmittelbar darunter (bei den betr. Flügen war er sowieso schon groß) vergrößert, und es kommt öfters unter und seitlich von ihnen zu mehr oder weniger großräumigen Vertikalbewegungen, die noch weit über der Fallstreifenuntergrenze bemerkbar sind. Es sei hier z.B. auf den Klartext vom 30.4.41 verwiesen: "7200 m Untergrenze des Cirrus, der unten aus Fallstreifen besteht. Darin böig, von 7200 bis 7800 m. Wegen dieser Böigkeit ist ein Beobachten der Eisteilchen durch das Mikroskop im Flugzeug in dieser Schicht nicht möglich. Es ist ein sehr gut ausgeprägter 22° Halo zu sehen."

In diesem Zusammenhang sei auch noch auf eine Arbeit von F. Höndorf²¹⁾ verwiesen, wonach unmittelbar in der Nähe der Fallstreifen aus Alto-Cumulus-Wolken Aufwinde entstehen, die sogar segelfliegerisch ausnützbar sind, - also von der Größenordnung $1 - 2$ m/sec. - und die dann neben den alten ausschneidenden Wolken eine neue Wasserwolke bilden.

Wir sehen also, daß neben und in Fallstreifencirren stärkere Vertikalbewegungen auftreten, durch die es dann in den aufsteigenden Luftmassen zur Frostübersättigung kommt. Diese Übersättigung wird, wegen der dünnen räumlichen Verteilung der Fallstreifenelemente, auch noch in den

Cirren fast vollständig aufrecht erhalten, da nur ein kleiner Teil des überschüssigen Wasserdampfes an den Cirrenelementen sublimiert. Herrscht aber Frostübersättigung, so müssen die Kondensfahnen schon, je nach dem Grad der Übersättigung, bei höheren Temperaturen als -43°C entstehen.

Wie schon aus dem Klartext vom 22.2.40 hervorgeht, entstehen stark verbreiternde Wolkenschweife sehr oft nur in einem horizontal eng begrenzten Gebiet. Das ist sehr erklärlich, da auch stärkere Vertikalbewegungen eng begrenzt sind. Außerdem sieht man auf den Abbildungen 15 und 16 in den natürlichen Wolken Helmholtzwogen, die darauf hindeuten, daß sich in diesem Teil der Atmosphäre eine Temperatur- und Windsprungschicht befand. Da sich unter solchen Sperrschichten Dunst anreichert, sind sie in Verbindung mit den öfters an ihnen gleichzeitig auftretenden - größere Gebiete umfassenden - Vertikalbewegungen, auf die schon F.Höndorf²²⁾ hinwies, für die Kondensfahnenbildung ebenfalls besonders gut geeignet, was auch die Aufnahmen vom 6.3.40 (Abb. 16) zeigen, bei denen die Auspuffwolken etwa bei -40°C auftraten.

Schon an den Abb. 15 und 16 (22.2.40 bzw. 6.3.40) erkennt man, im Gegensatz zu Abb. 12, daß sich die Auspuffwolken, ohne an Dichte zu verlieren, schnell verbreitert haben. Aus Gründen, die in einem späteren Abschnitt noch besprochen werden, kann man auch aus diesem Verhalten der Kondensfahnen schließen, daß ihre Umgebung stärker frostübersättigt gewesen sein mußte. Ganz Ähnlich war es am 9.2.40 (Abb. 17.) Hier traten dicht am Rand einer großen Lenticulariswolke (Wasserwolke), die nur einen Teil eines ausgedehnten Wogenfeldes darstellte, die Auspuffwolken auf, also in einem Gebiet, in dem die relative Feuchtigkeit fast 100 % beträgt. Am Rande einer anderen Woge dieses Feldes bildete sich eine weitere Kondensfahne, die in Abb. 20 dargestellt ist. Ganz ähnliche Verhältnisse müssen auch am 31.1.40 (Abb. 18) und 19.4.41 (Abb. 19) in der Atmosphäre vorgeherrscht haben. Leider fehlen an diesen Tagen Temperatur- und genaue Höhenangaben, da die Auspuffwolken von fremden Maschinen gebildet wurden. Diese

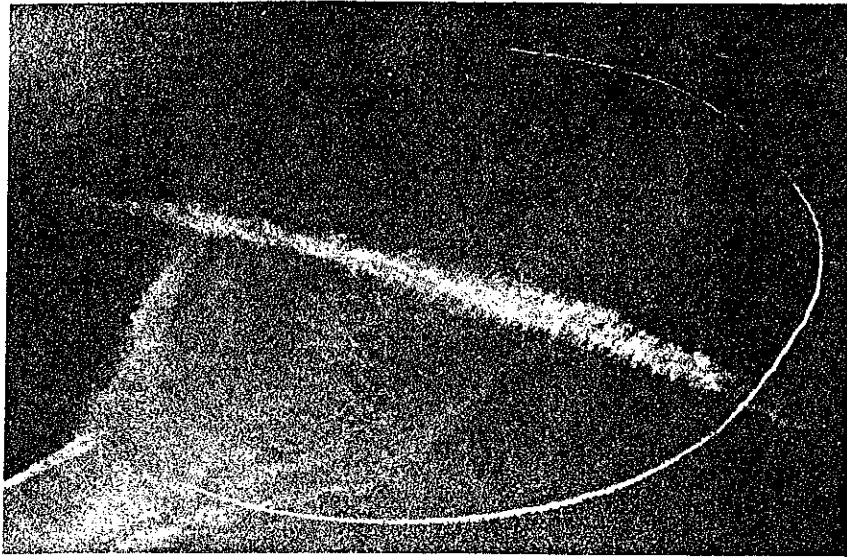


Abb. 15a: Kondensfahnen am 22.2.40 ...

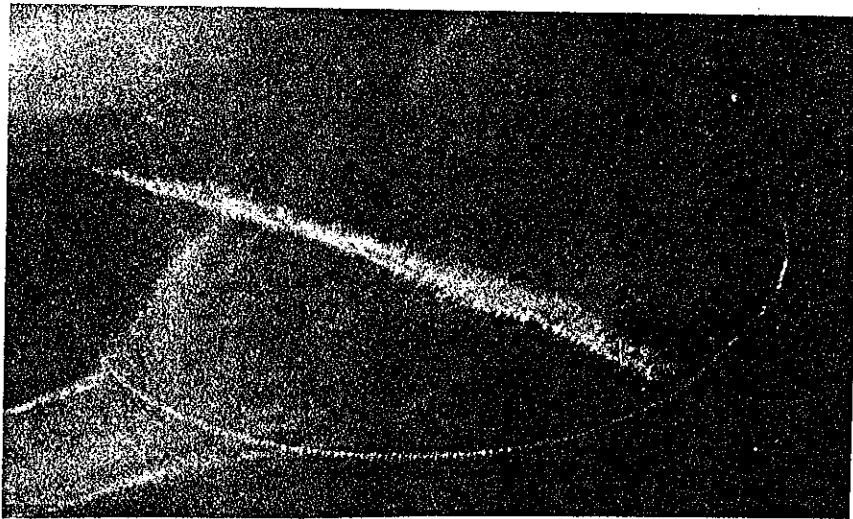


Abb. 15b: ... nach einigen Sekunden ...

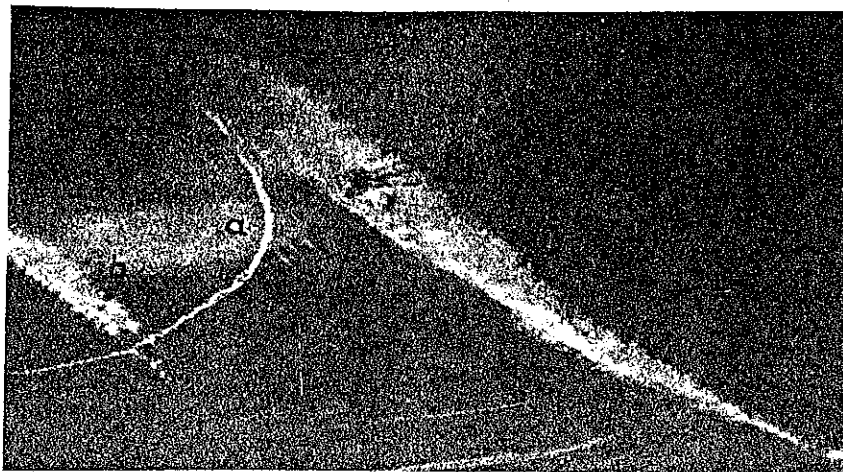


Abb. 15c: ... nach weiteren Sekunden.

Man beachte die rasche Bildung einer natürlichen Wolke
an der mit a bezeichneten Stelle.

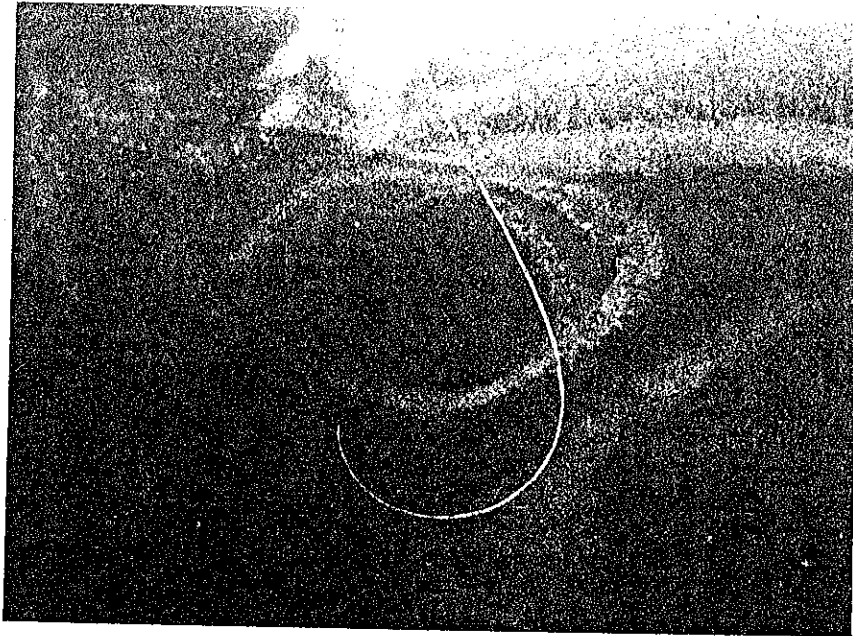


Abb. 16a: Kondensfahnen am 6.3.40.



Abb. 16b: In den natürlichen Wolken, in deren Höhe auch die Kondensfahnen auftraten, sind Helmholtzwogen vorhanden ().

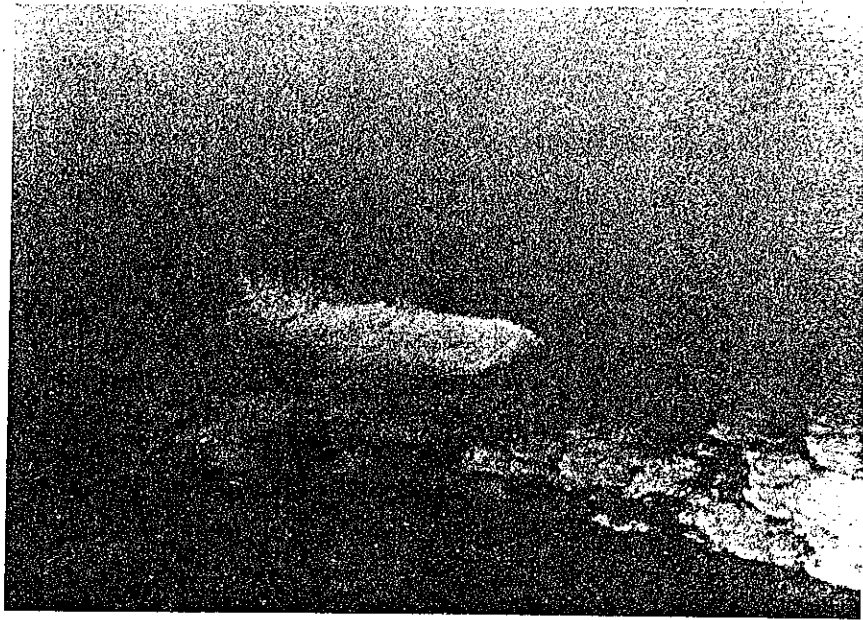


Abb. 17a: Kondensationsfahnen am 9.2.40 am Rand einer großen Lenticulariswolke. Beginn der Vereisung ...

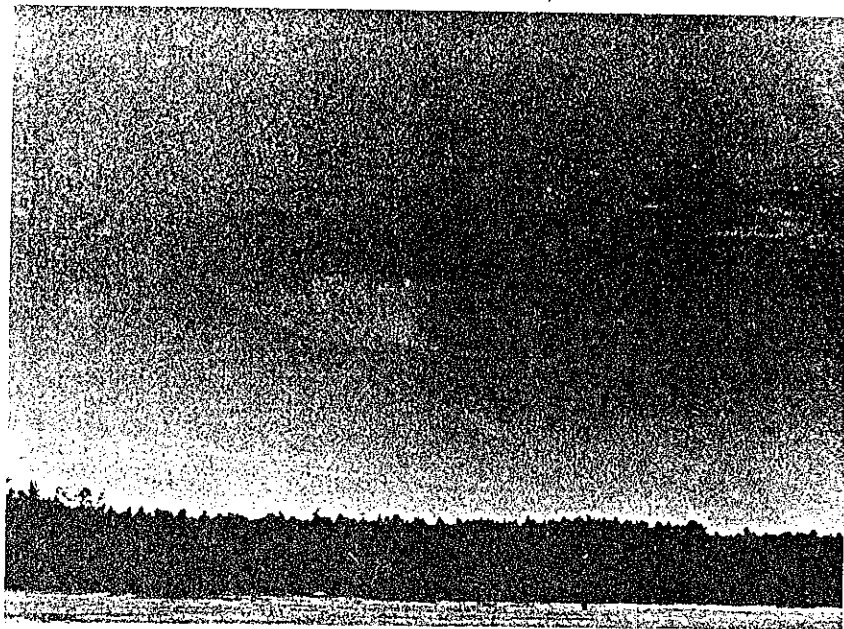


Abb. 17b: ... einige Zeit später: Fallstreifen.

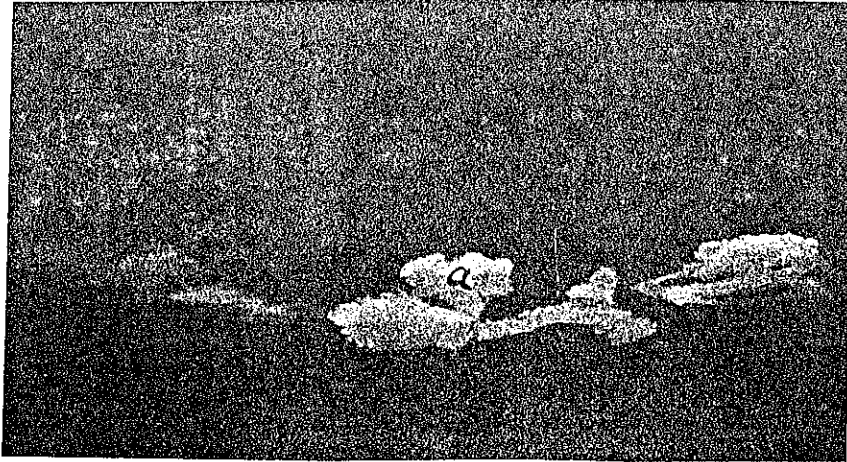


Abb. 18a: Auspuffwolken am 31.1.40.

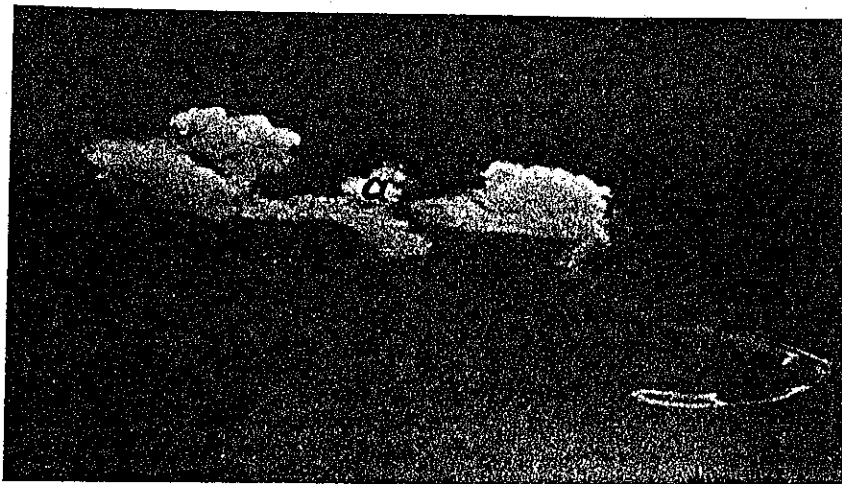


Abb. 18b: ... nach einigen Sekunden ...



Abb. 18c: ... nach etwa 20 Minuten.

a = Auspuffwolken, b = natürliche Wolken (Alto-Cumulus).



Abb. 19a: Auspuffwolken am 19.4.41..

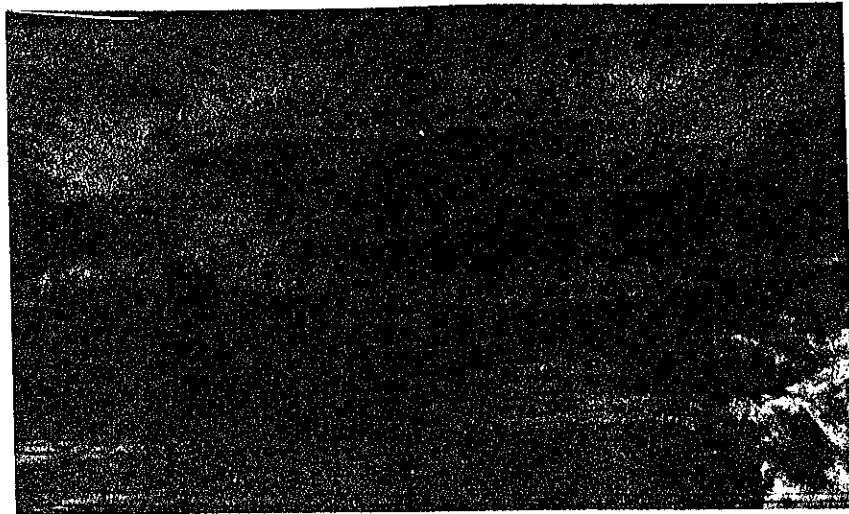


Abb. 19b: ... einige Zeit später ...

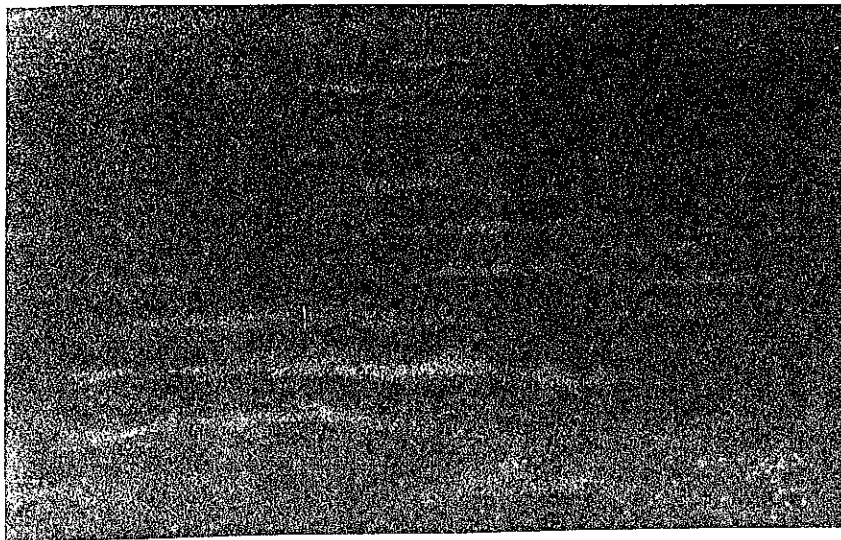


Abb. 19c: Alto-Cumulus-Bewölkung mit Helmholtzwoogen,
im gleichen Niveau wie die Auspuffwolken.

letztgenannten Auspuffwolken (Abb. 17 - 19) entstanden ebenfalls am Rand von Acu- bzw. Acu-lent.Feldern (Wasserwolken). An ihrem spontanen Auftreten und raschem Anwachsen konnte man erkennen, daß die Schichten, in denen sie sich bildeten, ebenfalls stark frostübersättigt gewesen sein mußten. Auch an diesen Beispielen, bei denen die Kondensfahnen in Gebieten auftraten, in denen bei stärkeren Vertikalbewegungen Frostübersättigung herrschte, bestätigt sich die Annahme, daß wegen der Keimbildungsgeschwindigkeit die Abkühlungsgeschwindigkeit bei den wolkenbildenden Vorgängen in der Atmosphäre eine bedeutende Rolle spielt.

Die Grenze also, die Krastanow in seinen Arbeiten - auf Grund der Volmer'schen Theorie - zwischen der Lischwolkenbildung durch direkte Sublimation und über unterkühlte Wassertröpfchen angibt, behalten zwar qualitativ ihre Gültigkeit, verschieben sich aber mit steigender Abkühlungsgeschwindigkeit in Richtung tieferer Temperaturen.

Künstliche Lappung der oberen Troposphäre.

An den in der Atmosphäre vorkommenden "Sublimationskernen" tritt bei größerer Abkühlungsgeschwindigkeit der Luft, wie wir feststellten, keine Sublimation ein. Es wurde deshalb versucht, durch künstliche Zufuhr von Kernen die Frostübersättigung auszulösen. Als Kerne dienten alle möglichen Verbrennungsprodukte und in letzter Zeit auch Quarzpulver. Die dafür vorgesehenen Brandsätze befanden sich in einer Sonde, die um vom Auspuffstrahl unbeflußt zu sein, 50 m unter der Maschine an einem Drahtseil hing und elektr.gezündet wurde. Das Quarzpulver wurde aus Tüten oder aus an den Flächenenden angebrachten Blechdosen der Luft zugeführt. Außer an einem Tag konnte in keinem Fall an den ausgestreuten Teilchen Verdichtung des Wasserdampfes festgestellt werden. Dieser eine Tag war der 10.12.40. Die "Quarzwolke" die sonst immer sofort nach dem Ausstreuen des Pulvers wieder verschwand, blieb beständig. Sie wurde in einer Schicht ausgestreut, in der die Auspuffwolken ebenfalls beständig blieben und sich

stärker verbreiterten. Auf der den Flugweg umgebenden Wolke wurde eine dreifache bunte Glorie bei -48°C beobachtet. Auf dem Auffangschirm konnte in dieser Wolke nur ein weißer Beschlag und keine Kristalle festgestellt werden. Es scheint sich also in diesem Fall um eine Wasserwolke gehandelt zu haben. Nach Schwerdtfeger²³⁾ ist das sogar sicher, denn er sagt: "... Man darf aber eine normale Glorie (mit einem oder mehreren farbigen Beugungsringen) nunmehr als sicheres Anzeichen für das Vorhandensein von Wassertröpfchen in der betr. Wolke ansehen." - An einer anderen Stelle wurde nochmals vom gleichen Quarzpulver ausgestreut. Aber nach ganz kurzer Zeit war nichts mehr von dem Pulver in der Atmosphäre zu sehen. Es sei noch erwähnt, daß die oben erwähnte Wolke auch vom Boden aus als Wasserwolke angesehen wurde. - Außer an diesem einen Tag konnte man also keinen Erfolg durch künstliche Kernzufuhr feststellen. Zum Teil kann das allerdings auch daran gelegen haben, daß man meistens durch sich vorschiebende Wolken das Verhalten der zugeführten Kerne nicht lange genug verfolgen konnte. Für nicht direkt isomorphe Kerne ist aber, wie wir gesehen haben, eine mehr oder weniger lange Zeit zur Kristallbildung notwendig.

Wasserübersättigung in der oberen Troposphäre?

Im Zusammenhang mit der künstlichen Kernzufuhr sei kurz auf die frühere Ansicht eingegangen, wonach die Kerne der Auspuffgase die Frostübersättigung auslösen.

In den Schichten, in denen mit Gas beständige Kondensfahnen entstanden, wurde öfters plötzlich das Gas bis auf "Leerlauf" zurückgenommen. Dabei enthalten die Auspuffgase nur noch sehr wenig Wasserdampf, aber immer noch genügend Kerne. Die Kondensfahne verschwindet aber dann sofort, Also nicht die festen Teilchen, sondern der Wassergehalt ist es, der die Kondensfahnen entstehen läßt. Mit diesem Versuch bestätigt sich auch die Annahme, daß genügend günstige Kondensationskerne in der Atmosphäre vorhanden sind,

daß aber eben eine größere Wasserübersättigung auch in den hohen Troposphärenschichten fehlt. Wenn sie vorhanden gewesen wäre, hätten sich auch bei Leerlauf Kondensfahnen gebildet, da die Auspuffgase sehr viele günstige Kerne enthalten, was jede Kernzählung mit dem Scholtz'schen oder Aitken'schen Kernzähler bestätigt. Jede, auch eine geringe Übersättigung hätte zur spontanen Wasserwolkenbildung führen müssen.

Da aber die Zahl von 150 Aufstiegen doch relativ klein ist, wollen wir vorsichtig formulieren: In der oberen Troposphäre tritt je nach der Temperatur öfters stärkere Frostübersättigung, aber höchstens sehr selten stärkere Wasserübersättigung auf.

Die Umbildung der Kondensfahne in eine Eiswolke.

Während die kurzen Kondensfahnen sicher nur aus Wassertropfchen bestehen, bilden sich die längeren und beständigen ebenso wie die unterkühlten Wasserwolken mit der Zeit in Eiswolken um. In den Auspuffgasen sind sehr viele Kerne enthalten, und die Auswahl zur Bildung von Eiskristallen ist deshalb groß. Außerdem wird die Umbildung noch dadurch beschleunigt, daß einzelne Eiskriställchen von dem Raufrostbeslag am Leitwerk durch die Strömung abgerissen werden. An diesen sublimieren dann die Tröpfchen der Kondensfahne natürlich sofort. Man kann deshalb annehmen, daß die Umbildung der Wassertropfchen in der Kondensfahne in Eiskristalle in den meisten Fällen in sehr kurzer Zeit stattfindet. Die Eiskristalle entziehen dann spontan der frostübersättigten Umgebung den überschüssigen Wasserdampf und werden schnell größer, sodaß sie nach einiger Zeit als Fallstreifen ausschneien. Das sieht man sehr schön auf Abb. 15c und 17b. Außerdem erkennt man in Abb. 20 wie die Kondensfahne (Eiswolke) an dem mit einem Pfeil bezeichneten Rand die sie umgebende Wasserwolke auffrißt.

Optische Erscheinungen in den sich verbreiternden Kondensfahnen.

In der aus Eisteilchen bestehenden Auspuffwolke zeigen sich oft sehr schöne optische Erscheinungen. So wurde auf der Auspuffwolke vom 9.2.40, Abb. 17, eine Nebensonne beobachtet. Auf einer anderen (Abb. 21) sieht man ein Stück eines Halos und schließlich zeigt Abb. 18 die Entwicklung der Auspuffwolken vom 31.1.40, die etwa 2 Stunden nach ihrer Entstehung den Himmel zur Hälfte bedeckten, und in denen ganz herrliche optische Erscheinungen auftraten. Bei diesen Erscheinungen handelte es sich um: den 22° Halo, den 46° Halo, die oberen beiden Berührungsbögen der beiden Halos, den Horizontalkreis mit einer Nebensonne mit Schweif und Nebengegensonne. Da die beiden Halos durch Lichtbrechung an 60° - und 90° -Kanten entstehen, bestanden die verbreiterten Kondensfahnen sicher aus einfachen hexagonalen Kristallen, die wegen des Erscheinens der Nebensonne und der Berührungsbögen noch gerichtet gewesen sein mußten. (Vergl. hierzu die Beobachtungen von W. Schwertfeger²³⁾ und A. Wegener¹⁾).

Kristallformen in Cirren.

Die Wassertröpfchen der Kondensfahnen scheinen sich also zu hexagonalen Kristallen umzubilden. Es ist nun interessant, daß in den Cirren von Fallstreifenstruktur, die in den Flugprotokollen über die beständigen Kondensfahnen erwähnt wurden, ebenfalls sehr gut ausgeprägte Haloerscheinungen beobachtet wurden. Da die Fallstreifenteilchen sehr oft ursprünglich auch aus Tröpfchen bestehen, entstehen anscheinend beim Gefrieren aus den unterkühlten flüssigen Wolkenpartikeln regelmäßig Kristallformen. Dazu schreibt Krastanow¹¹⁾: "Es ist bekannt, daß die einfach geformten Eiskristalle (Sog. Vollkristalle) in zwei Kristallformen erscheinen: hexagonale Säulchen - wenn das Wachstum in Richtung der Hauptachse verlaufen ist - und sechseckige Plättchen - wenn das Wachstum in Richtung der sekundären Achsen verlaufen ist. Obwohl diese Arten sehr oft gleichzeitig auftreten, ist durch Beobachtungen festgestellt worden, daß die Plättchen

besonders bei Temperaturen unterhalb etwa -15°C erscheinen. Für diesen Unterschied sind die verschiedenen Bedingungen, bei denen die Plättchen und Säulchen entstanden sind, verantwortlich. Wie wir oben bei unserem Beispiel gefunden haben, ist bei Temperaturen oberhalb -14°C die Wahrscheinlichkeit für die Bildung der Eiskristalle durch Auskristallisieren der unterkühlten Wassertröpfchen auf festen Teilchen größer als die für die Bildung der Eiskristalle direkt durch Kondensation des Wasserdampfes auf festen Teilchen. Die Tatsache, daß bei diesen Temperaturen meistens Säulchen entstehen, zeigt, daß 1. die Säulchen sich am wahrscheinlichsten durch Auskristallisieren der unterkühlten Wassertröpfchen bilden, 2. die Wachstumsgeschwindigkeit aus unterkühltem Wasser größer in Richtung der Hauptachse ist als in Richtung der sekundären Achsen, und 3. die Keimbildungsarbeit eines Kristallkeimes aus unterkühltem Wasser auf einer Fläche, die senkrecht zur Hauptachse steht, am kleinsten d.h. die Fläche leichter benetzbar ist (kleineres σ hat) als die Flächen, die parallel zur Hauptachse stehen. Natürlich ist von vielen Autoren festgestellt worden, daß die Säulchen am seltensten bei tiefen Temperaturen auftreten." Krastanow nimmt also ebenfalls an, daß aus unterkühlten Tröpfchen hexagonale Säulchen entstehen. Allerdings glaubt er, daß diese Säulchen im Wesentlichen nur bei Temperaturen bis etwa -15° auftreten. Das entspricht aber nicht den Tatsachen. Wenn die Folgerungen von Krastanow richtig sind, so können wir in Erweiterung sagen: Da öfters auch bei tiefen Temperaturen Wassertropfen als erstes Produkt auftreten, müßten infolgedessen auch die Säulchen im Gegensatz zu den bisherigen Anschauungen, bei diesen Temperaturen vorkommen. Dieses wurde durch die Beobachtungen auf dem Auffangschirm erwiesen, denn bei -50°C wurden noch prachtvoll ausgebildete Säulchen beobachtet. Sie wurden auf einem schwarzen Samtschirm aufgefangen und mit einem 50fach vergrößernden Mikroskop beobachtet. Ihre Länge betrug etwa 50 - 100, ihre Breite 10 - 20 μ . Sie traten fast immer im Zusammenhang mit Vertikalbewegungen auf, was obige

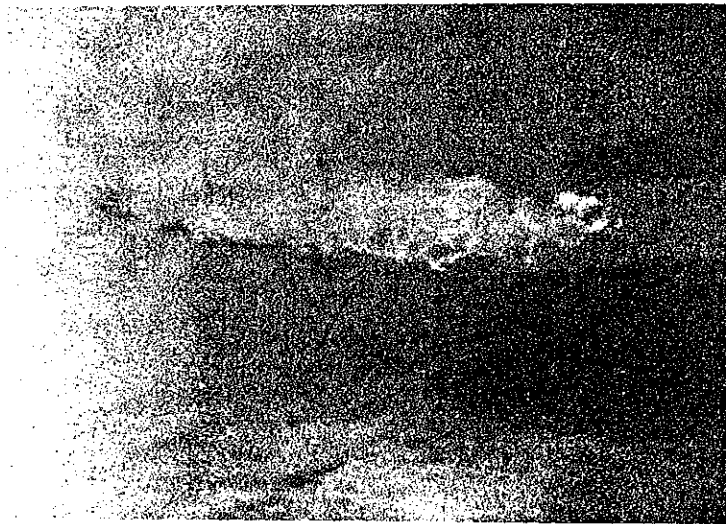


Abb. 20: Kondensfahne inmitten einer Alto-Cumulus-Wolke. Am Rand der Kondensfahne löst sich die Alto-Cumulus-Wolke zu Gunsten der Eisteilchen der Kondensfahne auf.

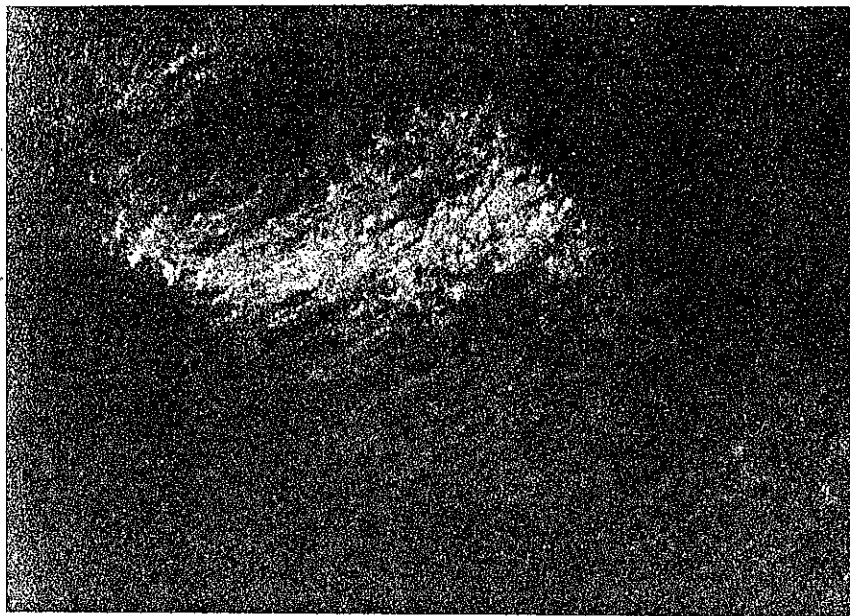


Abb. 21: Teil eines 22° Halo in einer Kondensfahne.

Annahme, daß sie ursprünglich aus Wassertröpfchen bestanden, ebenfalls zu bestätigen scheint. Es sei allerdings noch ergänzend zu Krastanow erwähnt, daß auch schon größere Eisübersättigungen (ohne daß Wassersättigung erreicht wird), bei denen bei höheren Temperaturen Schneesterne entstehen würden, genügen, um bei Temperaturen unter etwa -20° bis -30°C Säulchen entstehen zu lassen. - Im Gegensatz zu den hexagonalen Säulchen konnten nur sehr selten (ungefähr bei 5 % der 50 Beobachtungen) "Plättchen" oder "Tischchen" festgestellt werden. Schneesternchen oder Teile davon, wie sie Findeisen¹⁷⁾ in jungen Cirren vermutet, wurden niemals beobachtet. Anscheinend gehören zu ihrer Bildung doch größere spez. Feuchtigkeiten als sie bei diesen tiefen Temperaturen vorkommen. (Bei Temperaturen von etwa -20°C sind sie oft und sehr ausgeprägt vorhanden). Selbst wenn die Sternchen durch das Auftreffen auf den Schirm zersprungen wären, hätte man ihre Teilstücke ganz sicher als solche erkennen müssen. Weit am häufigsten, etwa zu 80 %, traten aber nicht die gut ausgeprägten hexagonalen Einzelkristalle auf, sondern "Eiskörnchen" oder Klümpchen", die fast wie Zusammenballungen von Körnchen aussahen. Ihre Größe betrug etwa $10 - 50 \mu$. Sie waren meistens von ebenen Flächen begrenzt. Im Gegensatz zu den Säulchen" kann man mit Krastanow sich die Körnchen durch langsame, - die Klümpchen durch schnellere Sublimation an den verschiedensten Begrenzungsflächen der festen Kerne entstanden denken. Sie haben das Aussehen wie die Kristalle, die H. Köhler in der zweiten Mitteilung seiner Arbeit "Zur Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre"¹⁸⁾ auf Seite 23, Fig. 8, dargestellt hat. (Abb. 22). Obwohl er annimmt, daß bei diesen Bildungen sicher Wassertropfen mitwirken, konnte er das nicht feststellen und schreibt deshalb: "Man kann nicht beurteilen, in welchem Grade diese Bildungen aus Tröpfchen bestehen", nachdem er an anderen Formen deutlich den Tröpfcheneinfluß feststellen konnte.

Da die Untersuchung von Cirrenteilchen erst später in das Programm der Höhenflüge aufgenommen wurde, ist das Material noch zu gering, um wirklich eindeutige Schlüsse über den Zusammenhang zwischen den einzelnen Kristallformen und den verschiedenen Cirrenarten bzw. Feuchtigkeitsverhältnissen ziehen zu können. Es wird deshalb lohnend sein, diese Untersuchungen in Verbindung mit experimentellen Versuchen im Laboratorium systematisch weiterzuführen, da sie manche interessanten Aufschlüsse über die Mikro-Physik der Cirren bringen werden.

Mächtigkeit von Cirren.

Ebenso wie über die Cirrenteilchen lagen bisher keine Beobachtungen über die Mächtigkeit von Cirren vor. Deshalb soll nun noch eine Zusammenstellung über die Mächtigkeit der Cirrenschichten und die Temperaturen, bei denen sie auftraten, gegeben werden. Unterschiede zwischen Sommer und Winter konnten nicht festgestellt werden. In der Abb. 23 ist die Mächtigkeit der bei den Flügen angetroffenen Cirren aufgetragen.

Diese Kurve hat zwei Maxima: Am häufigsten wurden dünne Cirrenschleier beobachtet, deren Mächtigkeit kleiner als 200 m war. Ein zweites Maximum liegt bei 2000 - 3000 m.

Die Temperaturen an der Untergrenze sind in Abb. 24, die an der Obergrenze in Abb. 25 dargestellt. Die Darstellungen zeigen je ein deutliches Maximum. Bei der Untergrenze lag dieses bei -31° bis -40°C , bei der Obergrenze bei -45° bis -50°C . Die gestrichelte Linie am Ende des Kurvenzuges in Abb. 25 wurde deshalb eingezeichnet, weil öfters noch über dem Gipfel des Fluges in der Stratosphäre dünne Cirrenschleier beobachtet wurden, ein Zeichen dafür, daß auch da noch die relative Feuchtigkeit Sättigung in Bezug auf Eis mindestens erreichen kann. In dem Übergangsbereich zwischen Troposphäre und Stratosphäre aber - in der Substratosphäre oder Tropopause, die durch eine Inversion gekennzeichnet ist, - ist die relative Feuchtigkeit sehr gering. Diese Inversion bildet deshalb auch sehr oft die

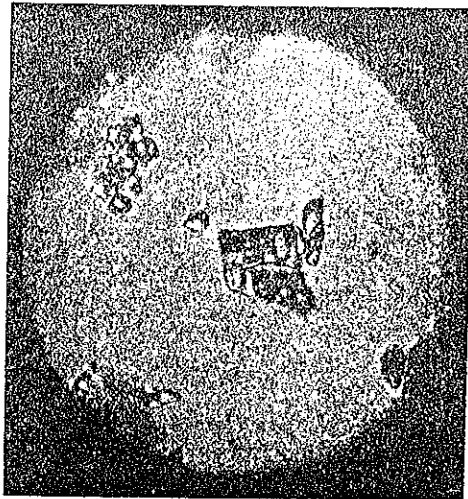


Abb. 22: Eiskristalle, die H.Köhler mit einem 30fach vergrößernden Mikroskop beobachtete und fotografierte.



Abb. 23: Graphische Darstellung über die Mächtigkeit von Cirren.

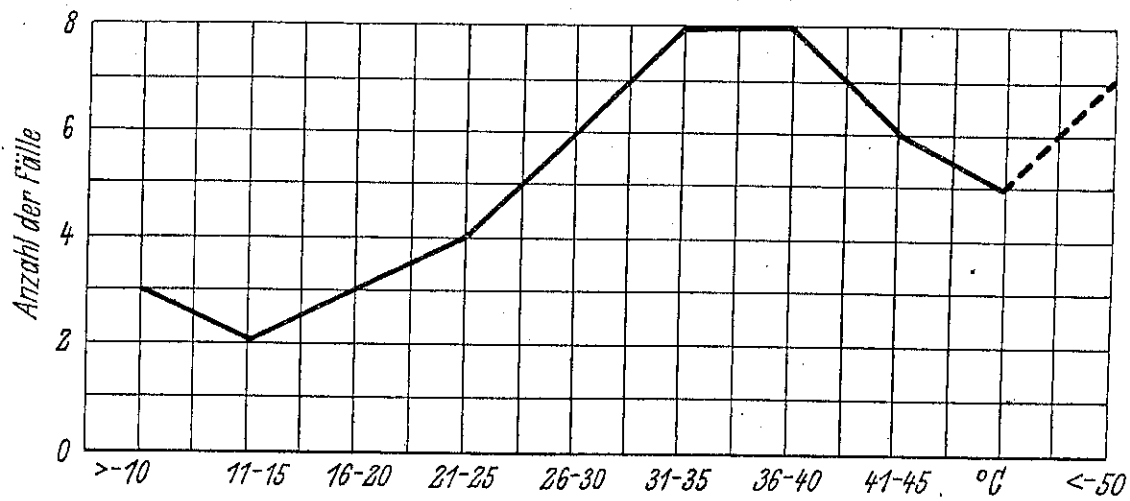


Abb. 24: Temperaturen an der Untergrenze von Cirren.

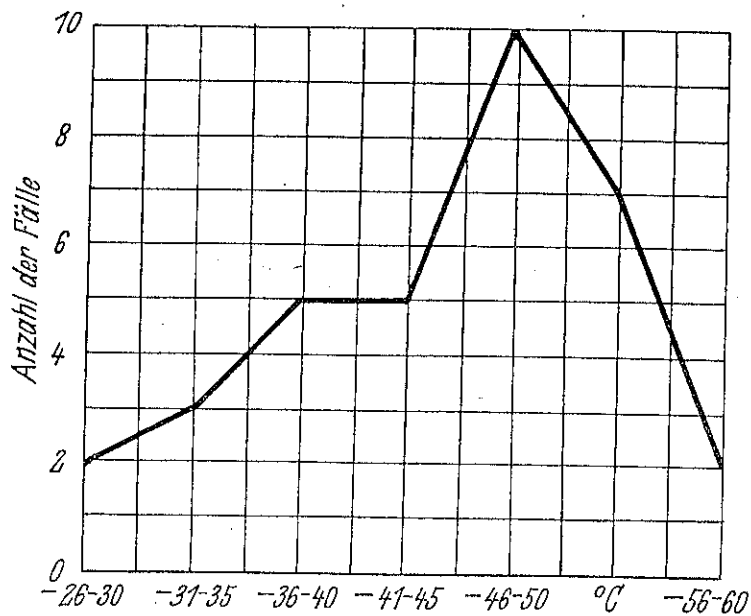


Abb. 25: Temperaturen an der Obergrenze von Cirren.

22. XI. 40

/// Auspuffwolken (Apw) kurz, dazwischen keine.

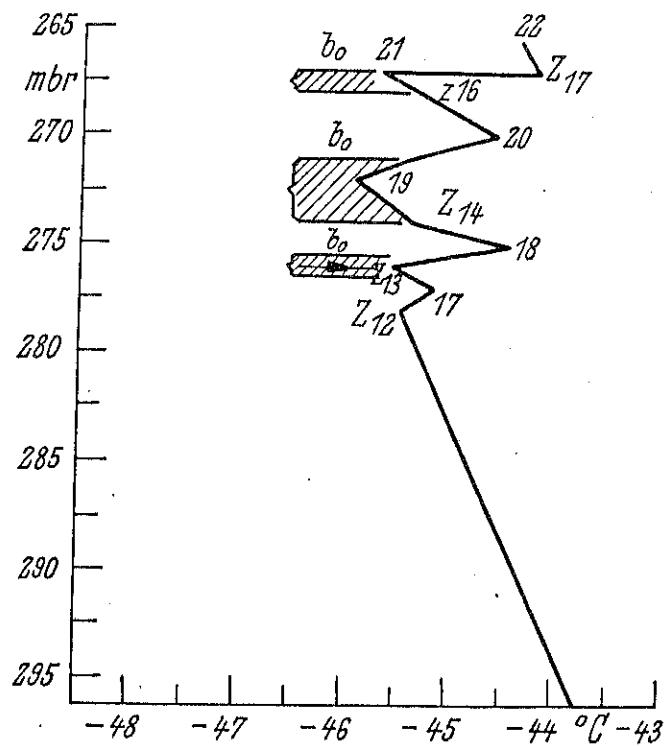


Abb. 26: Ausschnitt aus der Druckkurve.

Obergrenze der Cirren, die manchmal sehr glatt ist, manchmal stark welliges Aussehen hat. Bei den etwa 30 Flügen, die die Substratosphäre erreichten, wurde festgestellt, daß in ihr die Feuchtigkeit ganz plötzlich kleiner wird. Die Grenze ist oft sehr scharf. Die bis dahin oft mehr oder weniger lange Kondensfahne wurde trotz der sehr tiefen Temperaturen jedesmal schlagartig ganz kurz. Wie scharf oft diese Grenze ist, beweist ein Beispiel, bei dem die Inversion Schwingungen ausführte, und deshalb auf dem Flugweg mehrfach geschnitten wurde. Abb. 26 zeigt im großen Maßstab die Temperaturregistrierung dieses Fluges durch die Inversion. Die Maschine flog bei gleichmäßiger Tourenzahl leicht steigend. Dabei entstanden die Kondensfahnen ausschließlich unterhalb der Inversion. (Siehe Abb. 26.)

Zusammenfassung.

Bisher war die Ansicht verbreitet, daß die Kondensfahnen hinter Flugzeugen durch Zufuhr von Kernen in die kernarme, und deshalb als frostübersättigt angenommene, obere Troposphäre entstehen. Die in der D.F.S. durchgeführten Untersuchungen über die Entstehungsbedingungen der Kondensfahnen haben aber ergeben, daß nicht die Kernzufuhr, sondern die Zufuhr des in den Auspuffgasen enthaltenen Wasserdampfes die Ursache für ihre Entstehung ist. Die Kondensfahnen entstehen nämlich dann, wenn das zugeführte Wasser plus dem in der Atmosphäre enthaltenen den Sättigungswert überschreiten. Da die in den Auspuffgasen enthaltene Wasserdampfmenge bekannt ist, kann man aus der Bildung der Kondensfahnen in erster Näherung die rel. Feuchte der ungestörten umgebenden Luft für die Höhe berechnen, in der sie sich bilden.

An den Meßtagen betrug die relative Feuchtigkeit in der oberen Troposphäre durchschnittlich 50 %. Jedoch kamen auch zeitweilig Frostübersättigung und sogar Wasservolken, also Wassersättigung, noch bei Temperaturen bis zu etwa -50°C vor. Merkbare Wasserübersättigung dagegen haben

wir nie angetroffen, was sicherlich darauf zurückzuführen ist, daß auch noch in diesen Höhen genügend Kondensationskerne vorhanden sind.

Auf Grund der Volmer'schen Theorie wird in vorliegender Arbeit eine Hypothese entwickelt, nach der die Ursachen der Wasser- bzw. Eiswolkenbildung bei tiefen Temperaturen erklärt werden können:

Zur spontanen Bildung von ersten Wassertröpfchen aus homogenem Wasserdampf, die dann ohne Arbeitsaufwand weiterwachsen können, ist je nach der Temperatur eine mehrfache Übersättigung notwendig. Der Radius dieser ersten Tröpfchen beträgt etwa $5 \cdot 10^{-8}$ cm; und zwar entstehen sie bis zu Temperaturen noch unter -70°C . Erst bei noch tieferen Temperaturen entwickeln sich Eiskristalle; denn zur Bildung von ersteren ist bis zu diesen tiefen Temperaturen eine geringere Energie notwendig als zur Bildung der letzteren. Sind Kondensationskerne vorhanden, so wirken diese schon wie Tröpfchen von der Größe dieser Kerne, und es ist dementsprechend eine kleinere Übersättigung notwendig, damit diese Tröpfchen spontan weiterwachsen können. Die Übersättigung läßt sich in Abhängigkeit von der Kerngröße nach der Thom von-Gibbs'schen Gleichung berechnen. Sind dem Eis isomorphe Sublimationskerne in der Atmosphäre vorhanden, so entstehen auch dann schon bei kleineren Übersättigungen und höheren Temperaturen Eiskristalle. Da die isomorphen Kerne meistens auch von Wasser benetzbar sind und damit auch als Kondensationskerne wirken, verschiebt sich die Temperatur, unter welcher Eis und über welcher Wasser entsteht, mit größer werdenden isomorphen Kernen - und deshalb auch kleineren zur Verdichtung des Wasserdampfes notwendigen Übersättigungen, - in den Bereich höherer Temperaturen. Bei Kerngrößen von etwa 10^{-4} bis 10^{-6} cm, wie sie in der freien Atmosphäre vorkommen, liegt diese Temperatur nahe bei 0°C .

Sind die Sublimationskerne - wie es tatsächlich in der Atmosphäre der Fall ist - nicht vollkommen isomorph, so ist zur Sublimation an ihnen eine größere Übersättigung notwendig, als an einem isomorphen Kern von gleicher

Größe; oder aber: die Bildung eines Kristalls dauert je nach der Übersättigung und der Oberflächenstruktur des Kernes mehr oder weniger lang und ist nicht wie bei einem isomorphen Kern spontan. Hat es aber erst einmal zahlreichere Kristalle gegeben, dann wachsen diese rasch so lange, bis in ihrer nächsten Umgebung Eissättigung herrscht.

Im Gegensatz dazu tritt, da ja in der freien Atmosphäre genügend günstige Kondensationskerne vorhanden sind, an diesen, sobald die ihrer Größe entsprechende Übersättigung erreicht oder nur ganz wenig überschritten ist, spontan Tröpfchenbildung ein. Die Abkühlung bei Konvektionswolken geschieht gewöhnlich so schnell, und die dabei auftretende Eisübersättigung in Bezug auf die in der Atmosphäre tatsächlich vorkommenden Kerne bleibt so gering, daß die Zeit zwischen Eissättigung und Wassersättigung nicht zur Kristallbildung ausreicht. Deshalb entstehen bis zu Temperaturen von -50° und evtl. tiefer Wasserwolken, die sich dann nach einiger Zeit zu Eiswolken umbilden. Bei kleinen Abkühlungsgeschwindigkeiten, wie sie etwa bei der Bildung von Schicht- und Strahlungswolken auftreten, ist die Zeitspanne zwischen Eis- und Wassersättigung anscheinend groß genug, um Kristalle zu bilden.

Wenn auch die Untersuchungen der Cirrenteilchen noch in den Anfängen stecken, so zeigen doch die Beobachtungen, daß am meisten Körnchen und Klümpchen auftreten. Säulchen und Plättchen wurden bisher seltener beobachtet. Schneesternchen traten überhaupt nicht auf. Da vor allem in Fallstreifen-Cirren, die oft ursprünglich aus Tröpfchen bestanden, Säulchen gefunden wurden, liegt die Vermutung nahe, daß sich diese aus den unterkühlten Wassertröpfchen bilden.

Am Ende der Arbeit werden noch die Beobachtungen über die Mächtigkeit der Cirren zusammengestellt.

Literaturverzeichnis.

- 1) A.Wegener: Frostübersättigung und Cirren. M.Z.1920.
- 2) H.Köhler: Zur Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre. 1.Mitt.Geofysiske Publikationen, Bd.II.
- 3) P.Schmauß: Bildung einer Cirruswolke durch einen Flieger. M.Z.1919.
- 4) P.Lautner: Wolkenbildung durch ein Flugzeug. M.Z.1928.
- 5) W.Peppler: Wolkenbildung durch Flugzeuge. Das Wetter 1930.
- 6) H.Kirsten: Wolkenbildung durch Flugzeuge. Deutsche Flugwetterdienst, Erfahrgs.Ber.(3.Sond.Band)1932.
- 7) E.Schmidt: Die Entstehung von Eisnebel aus den Auspuffgasen von Flugmotoren.Deutsche Akademie für Luftfahrtforschg.Schr.1021/40g.
- 8) F.Höhndorf: Eiswolkenerzeugung in größeren Höhen durch Flugzeuge. Deutsche Luftfahrtforschung. Forschungsbericht Nr.1134,Z.w.B.1939.
- 9) F.Höhndorf: Beitrag zum Problem der Vermeidung von Auspuffwolken hinter Motorflugzeugen.Dtsch.Luftfahrtforschg.Forschgs.Ber.Nr.1371,Z.w.B.1941.
- 10) W.Peppler: Die relative Feuchtigkeit in der freien Atmosphäre über Süddeutschland.Das Wetter 1937.
- 11) L.Krastanow: Über die Bildung der unterkühlten Wassertropfen und der Eiskristalle in der freien Atmosphäre. M.Z.1940. X
- 12) L.Krastanow: Beitrag zur Theorie der Tropfen- und Kristallbildung in der Atmosphäre. M.Z.1941. X
- 13) E.Wall: Physik der Keimbildung in der Meteorologie. Das Wetter 1940.
- 14) M.Volmer: Kinetik der Phasenbildung. Chem.Reaktion, Bd.IV,Verl.Steinkopf,Dresden u.Leipzig,1939.
- 15) A.u.K.Wegener:Physik der freien Atmosphäre,Leipzig 1935.
- 16) W.Findeisen: Die kolloidmeteorologischen Vorgänge bei der Niederschlagsbildung.M.Z.1938.
- 17) W.Findeisen: Flugmeteorolog.Schneebeobachtungen.M.Z.1939.
- 18) H.Köhler: Zur Kondensation des Wasserdampfes in der Atmosphäre. 2.Mitt.Geof.Publ.Bd.II.
- 19) M.Volmer: Keimbildung u.Keimwirkung als Spezialfälle der heterogenen Katalyse. Zeitschr.f.Elektrochemie,Bd.35,1929.
- 20) J.Küttner: Zur Entstehung der Föhnwelle.Beitr.Phys.fr. Atm. 1939, Bd.25.
- 21) F.Höhndorf: Möglichkeiten des Segelfluges in größeren Höhen. Jahrb.1937 d.dtsch.Luftfahrtforschg.
- 22) W.Schwerdtfeger: Wasserglorien und Eisglorien. M.Z.1938. X